



TITLE:

極低温ケーブルの製作とその特性 に関する開発研究(Dissertation_全 文)

AUTHOR(S):

久保, 功

CITATION:

久保, 功. 極低温ケーブルの製作とその特性に関する開発研究. 京都大学
, 1982, 工学博士

ISSUE DATE:

1982-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r4682>

RIGHT:

3

極低温ケーブルの製作と

その特性に関する開発研究

1981年

久保功

極低温ケーブルの製作とその特性に関する開発研究

1981年

久保功

DOC
1981
25
電気系

目 次

第 1 章 序 論	1
第 2 章 極低温ケーブルの構成	3
§ 2.1 梗 概	3
§ 2.2 導体の構成	3
< 2.2.1 > 導体材料	3
< 2.2.2 > 表皮効果	6
§ 2.3 電気絶縁	8
< 2.3.1 > 電気絶縁方式	9
< 2.3.2 > 液化ガスの特性	9
< 2.3.3 > 液体窒素の絶縁耐力	10
< 2.3.4 > テープ材料の誘電特性	12
< 2.3.5 > 液体窒素含浸テープ材料の破壊特性	12
< 2.3.6 > 液体窒素含浸ポリエチレン不織布課電試料の破壊特性	14
§ 2.4 熱 絶 縁	21
< 2.4.1 > 真空を使用する熱絶縁方式	21
< 2.4.2 > 真空を使用しない熱絶縁方式	24
§ 2.5 要 約	27
第 3 章 154 KV極低温モデルケーブルの開発	28
§ 3.1 梗 概	28
§ 3.2 154 KV第1次モデルケーブル	28
< 3.2.1 > ケーブルの構成	28
< 3.2.2 > モデルケーブルの特性	34
§ 3.3 154 KV第2次モデルケーブル	36
< 3.3.1 > ケーブルの構成	36
< 3.3.2 > モデルケーブルの特性	47
§ 3.4 要 約	53
第 4 章 500 KV極低温ケーブルの設計と送電容量の検討	54
§ 4.1 梗 概	54

§ 4.2	500 KV極低温ケーブルの設計	54
< 4.2.1 >	ケーブルの構造	54
< 4.2.2 >	電気絶縁設計	54
< 4.2.3 >	熱絶縁設計	56
< 4.2.4 >	ケーブルの熱損失	56
< 4.2.5 >	ケーブルの冷却方式	59
< 4.2.6 >	導体内冷媒流路の決定	59
§ 4.3	冷却方式とケーブル内温度分布	69
§ 4.4	冷却方式と送電容量，冷却距離	72
< 4.4.1 >	冷却方式 a) の場合	72
< 4.4.2 >	冷却方式 b) の場合	78
< 4.4.3 >	冷却方式 c) の場合	78
§ 4.5	液体窒素冷却極低温ケーブルの経済性	81
§ 4.6	要 約	84
第 5 章	500 KV極低温ケーブル終端箱の開発	85
§ 5.1	梗 概	85
§ 5.2	終端箱設計の基礎的資料	85
< 5.2.1 >	真空絶縁方式	85
< 5.2.2 >	ガス絶縁方式	86
< 5.2.3 >	油浸紙絶縁方式	86
§ 5.3	154 KV級極低温ケーブル終端箱の開発	92
< 5.3.1 >	終端箱の構造	92
< 5.3.2 >	課電試験	93
< 5.3.3 >	通電試験	93
§ 5.4	電流リードの温度分布および侵入熱の解析	95
< 5.4.1 >	電流リードの温度分布	95
< 5.4.2 >	絶縁油の温度分布	98
< 5.4.3 >	侵入熱	99
< 5.4.4 >	温度分布の計算値と実測値との比較	99
< 5.4.5 >	循環油量の影響	102

< 5.4.6 > 通電々流の影響	102
< 5.4.7 > 侵入熱と循環油温度分布	102
§ 5.5 500 KV極低温ケーブル終端箱の開発	104
< 5.5.1 > 終端箱の構造及び絶縁設計	104
< 5.5.2 > 課電試験	105
< 5.5.3 > 熱安定性の検討	109
§ 5.6 要 約	111
第 6 章 500 KV極低温モデルケーブルの開発	112
§ 6.1 梗 概	112
§ 6.2 モデルケーブルの構成	112
< 6.2.1 > モデルケーブルの構造	112
< 6.2.2 > 導 体	112
< 6.2.3 > 電気絶縁	118
< 6.2.4 > 低温圧力容器	119
< 6.2.5 > 熱 絶 縁	119
< 6.2.6 > 終 端 箱	120
§ 6.3 モデルケーブルの冷却	121
§ 6.4 モデルケーブルの特性	122
< 6.4.1 > ケーブルコアの曲げ特性	122
< 6.4.2 > 課電試験結果	122
< 6.4.3 > 誘電特性	122
< 6.4.4 > 送電容量と熱負荷特性	122
§ 6.5 要 約	130
第 7 章 結 論	132
謝 辞	134
引 用 文 献	135
付録 記号表	138

第 1 章 序 論

我国における電力需要の増大は著しく、これに対応して火力或は原子力発電所の大容量化が進められ、その結果発電機単機あたり 600～1,000 MVA のものが出現し、将来は発電容量が 5,000 MVA 以上の発電所の建設が予想される。しかし大容量発電所は用地難のために需要地から次第に遠隔の地に設置せざるを得ない現状であって、これに対し 3,000～5,000 MVA 程度の大容量送電線路の建設が検討されている。

従来大容量送電線路としては、超高圧架空線路が用いられて来たが過密化した都市では用地難、保安、美観、誘導障害等の見地から送電線の地中化が要望されている。これに対し地下ケーブルの大容量化は在来ケーブルの延長として高電圧化、大導体化、強制冷却の採用等を適用するにしても 2,500 MVA 程度の送電容量が限度と考えられる。そこで送電容量を飛躍的に増大させる方法の一つに、極低温ケーブルがとりあげられ現在世界各地で研究開発が行われている。

周知のように極低温ケーブルは大別して超電導ケーブル (Super conducting Cable) と極低温ケーブル (Cryoresistive Cable) に分けられる。前者は超電導材料 (Nb, NbTi, Nb₃Sn 等) を導体に用い、導体抵抗ゼロの超電導現象を利用したものであり、後者は極低温時の導体抵抗の低下を利用し発生した導体損を強制的に排出し乍ら大電力の輸送を行うものであって、冷媒として液体窒素が、最も安全で使い易く経済的であり絶縁油と同程度の電気特性を示すので一般に用いられる。極低温を得るための冷凍機の効率は温度の低下と共に急激に悪くなり、その上前者の場合に用いられる大容量のヘリウム冷凍機には未開発要素が多く残っているので後者の方が実現するには、はるかに技術的に容易である。

上述の要求と原理にもとづき、本論文は将来の大容量送電ケーブルの一つと目される液体窒素冷却極低温ケーブルの基礎研究結果と 154 KV 及び 500 KV モデルケーブルを開発した技術的成果を報告するものである。

先づ、このケーブルの構成要素である導体系、電気絶縁系、熱絶縁系について、500 KV 級ケーブルの実現の可能性を知る基礎実験を行うため、導体系では導体材料としてアルミを、また電気絶縁系では冷媒としての液体窒素をとりあげているが、その他に更に極低温におけるケーブルの熱的電気的問題の検討、およびモデルケーブルの強制冷却用ユニットの開発等が必要となる。

本研究では開発対象として 154 KV および 500 KV (3,000～5,000 MVA) ケーブルについて検討し、更にこのケーブルの経済性を従来の大容量ケーブルと比較している。そのため製造と輸送上の制約からコアの仕上り外径を、なるべく小さく押えて最も経済的なケーブル断面構造

を求めると共に、送電容量と冷凍機設置間隔、及びケーブル内の温度分布に関する理論式を誘導している。

極低温ケーブル用の終端箱は超高電圧下で常温から極低温までの長さ方向に大きい温度こう配で大電流を通電しなければならないが、これを技術的に可能にするために154KVおよび500KV級終端箱の開発を行い、通電々流に対するリードの温度分布の変化を測定してこの終端箱の熱安定性を検討し、他方では理論式を誘導し実測値との比較を行っている。

最後に、これ等の研究結果を踏まえ、気中終端箱と液中終端箱を夫々両端に接続した500KV、5,000MVA級モデルケーブルを製作し、冷却実験と耐電圧試験を行い500KVケーブルの特性について検討し、更にこのケーブル2回線の8,000～10,000MVA送電における送電容量と熱負荷の関係を計算によって求め、これを8,000MVA送電の強制冷却されたPOFケーブル6回線と比較検討したものである。

第 2 章 極低温ケーブルの構成

§ 2.1 梗 概

極低温ケーブルを実現させるために、その構成要素である導体系、電気絶縁系、熱絶縁系について各々の特徴と基礎特性に関して検討する。すなわち導体系では導体材料の一つであるアルミをとりあげ、極低温下の固有抵抗に及ぼす純度と熱処理条件の影響を求める。次に固有抵抗の低下による渦電流の増大の為の交流抵抗の増加と、それを小さくさせるより線構造について検討する。

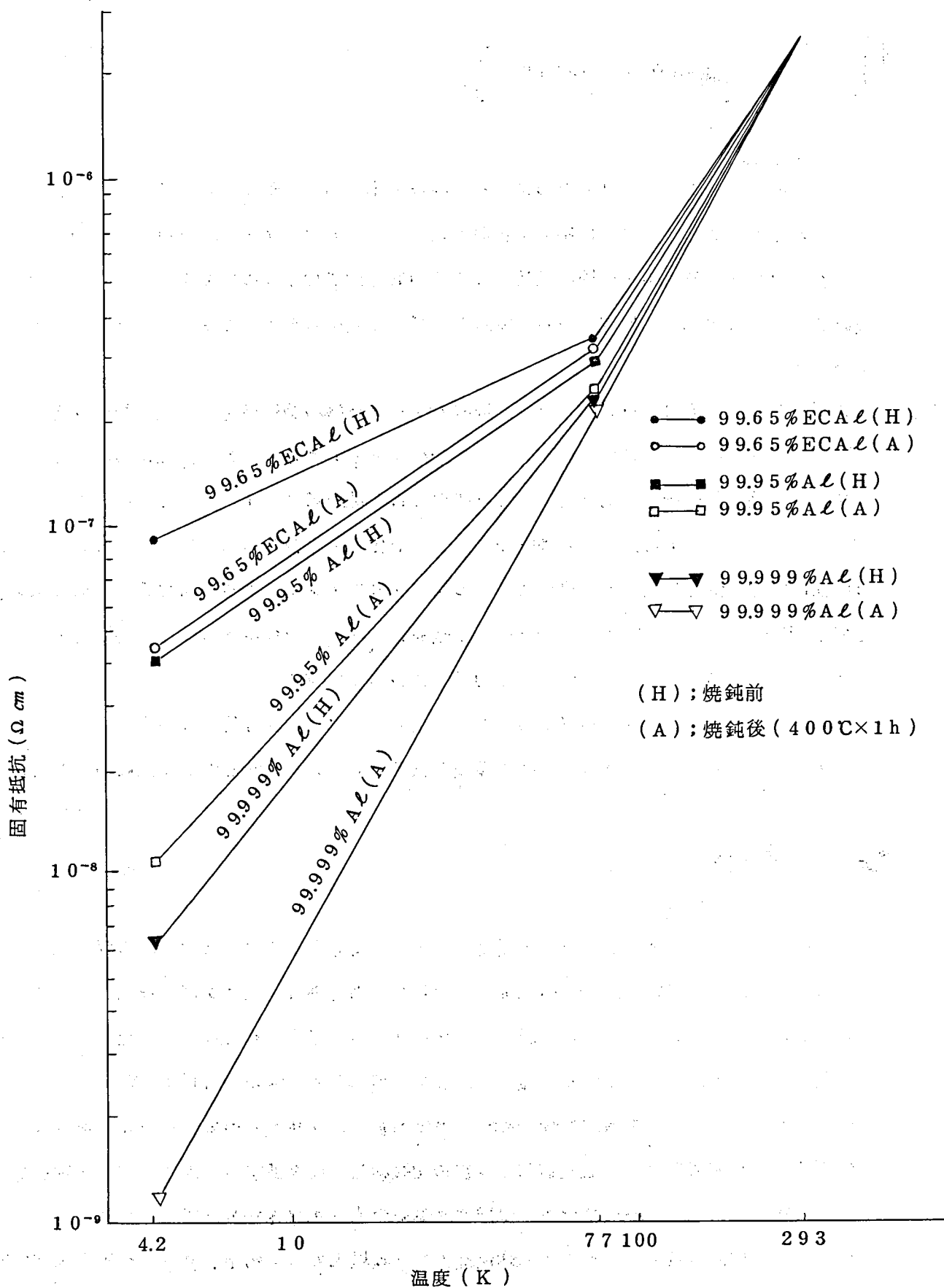
電気絶縁系では従来の OF ケーブルと同様なテープ積層の絶縁構造が、電氣的に安定していると考えられるので、冷媒含浸のテープ積層絶縁をとりあげる。この可能性を検討するために冷媒と含浸絶縁体の両方の働きをする液体窒素の電気破壊特性を求めている。次にこのケーブルの絶縁テープとして考えられる種々のテープの液体窒素含浸状態における絶縁破壊電位¹⁾を求め、油浸状態の値と比較する。更にこれ等のテープの中でクラフト紙と同程度の絶縁破壊電位¹⁾を持ち、誘電特性の秀れているポリエチレン不織布紙に関し、液体窒素含浸下の絶縁耐力に及ぼすテープの厚さ効果、及び液体窒素の圧力効果について検討する。

終りに熱絶縁系では有効な熱絶縁方式を得るために、最も断熱性能の高い真空多層断熱について輻射シールドテープ及びスペーサの種類と枚数を変え、その断熱性能を比較検討している。

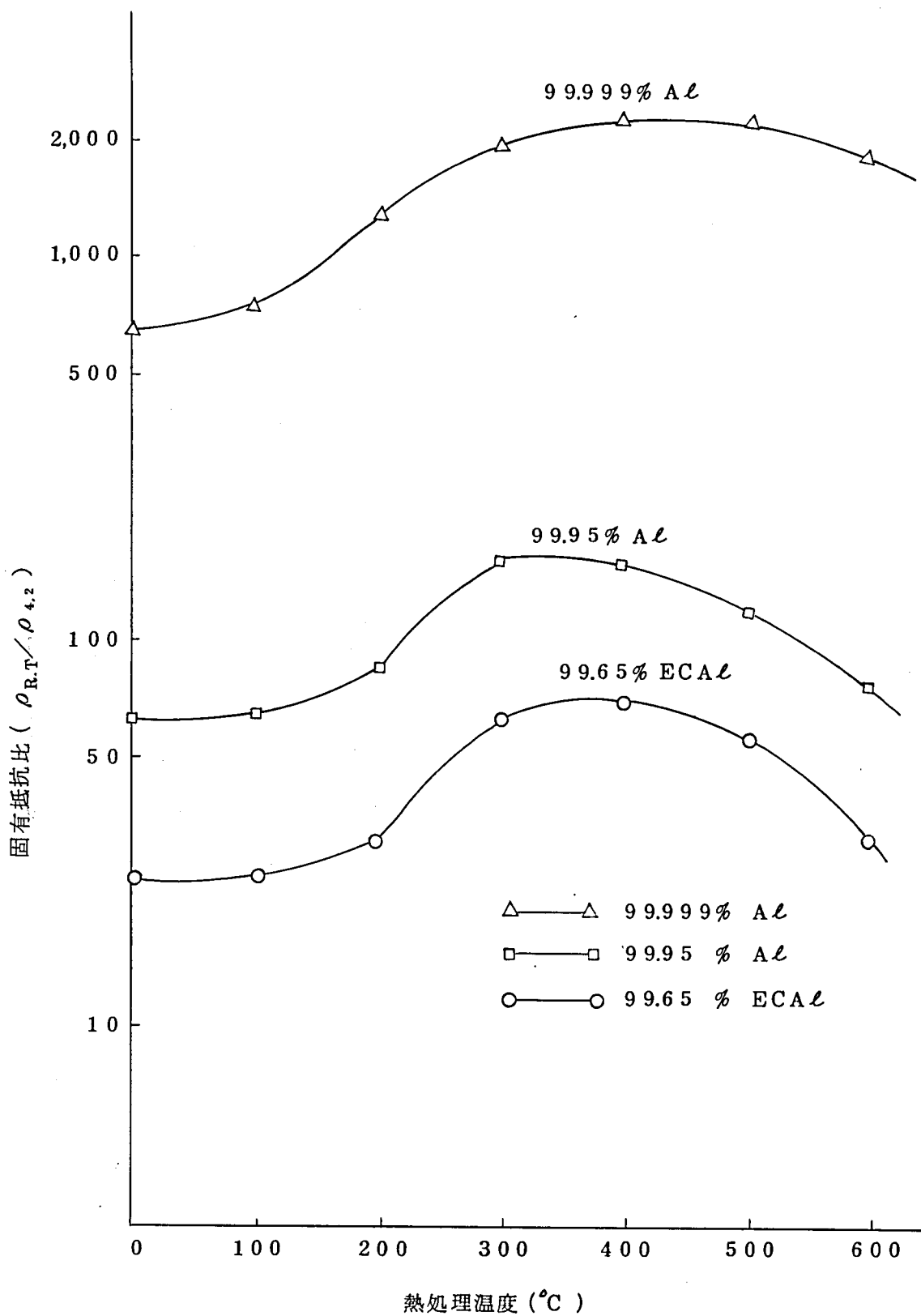
§ 2.2 導体の構成

< 2.2.1 > 導体材料

このケーブルの導体材料の一つと考えられるアルミをとりあげ、各種純度の固有抵抗の温度特性を 4 点法を用いて測定し第 2.1 図に示した。固有抵抗は純度が高く極低温になる程小さくなる。一方線引等の加工歪で固有抵抗が増加するが適当な熱処理で加工歪がとれ結晶が成長して固有抵抗は小さくなる。第 2.2 図に熱処理温度が室温の固有抵抗 $\rho_{R.T}$ と 4.2 K の固有抵抗 $\rho_{4.2}$ の比に及ぼす効果を示す。熱処理温度が 400℃前後にこの比を最大にする温度の最適値が存在する。最適値以上の温度では結晶中に不純物の再固溶が起って抵抗値を上げる働きをする。又最適値以下の温度では結晶の成長が進まず抵抗値が下らない。しかし液体窒素冷却極低温ケーブルでは導体温度が 77 K 以上であるので、純度や熱処理条件の固有抵抗に与える影響はあまり大きくない。又アルミと銅の固有抵抗にも大差がない。¹⁾しかしアルミは銅に比して同じ電流容量で約 30% 軽く従って体積比熱が約 30% 小さくなるので



第 2.1 図 各種純度アルミの固有抵抗の温度特性



第 2.2 図 アルミの固有抵抗比と熱処理温度

冷却には有利となる。一方極低温における機械特性も大差がないので導体材料としては銅よりもアルミが好ましい。

< 2.2.2 > 表皮効果²⁾

上述のように極低温下では導体材料の固有抵抗が小さくなり、室温の場合よりも表皮効果が大きく渦電流損が増すので、導体の厚さを表皮深さ以上にしても電流容量の増加に対する効果は小さい。

表皮深さは次式で求められる。

$$\delta_c = \sqrt{\frac{2 \rho_c}{\mu_0 \omega}} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここに δ_c ; 表皮深さ (cm), ρ_c ; 導体の固有抵抗 ($\Omega \text{ cm}$)

μ_0 ; 真空の透磁率 = $4 \pi \times 10^{-9}$ (H/cm), $\omega = 2 \pi f$

(2.1) 式より 50 Hz に対する表皮深さと固有抵抗の関係を求め第 2.1 表に示した。

第 2.1 表 アルミの固有抵抗と表皮深さ

温 度	(K)	293	77	20	4.2
固有抵抗	($\Omega \text{ cm}$)	2.5×10^{-6}	2.5×10^{-7}	5×10^{-8}	10^{-8}
表皮深さ	(cm)	1.126	0.356	0.159	0.071

常温の 293 K の $\delta_c = 1.126 \text{ cm}$ に対して ρ_c が $1/250$ になる液体ヘリウム温度 4.2 K では $\delta_c = 0.071 \text{ cm}$ と極端に小さくなって終う。従ってこの温度まで導体を冷却して ρ_c を低下させても導体厚さを δ_c 程度にしか利用出来ないので導体抵抗を下げる効果は小さい。表皮効果を押える方法として中空円筒形導体では、導体の内側と外側の電流密度の均一化を計るために素線のトランスポーズを行ったより線が必要になる。

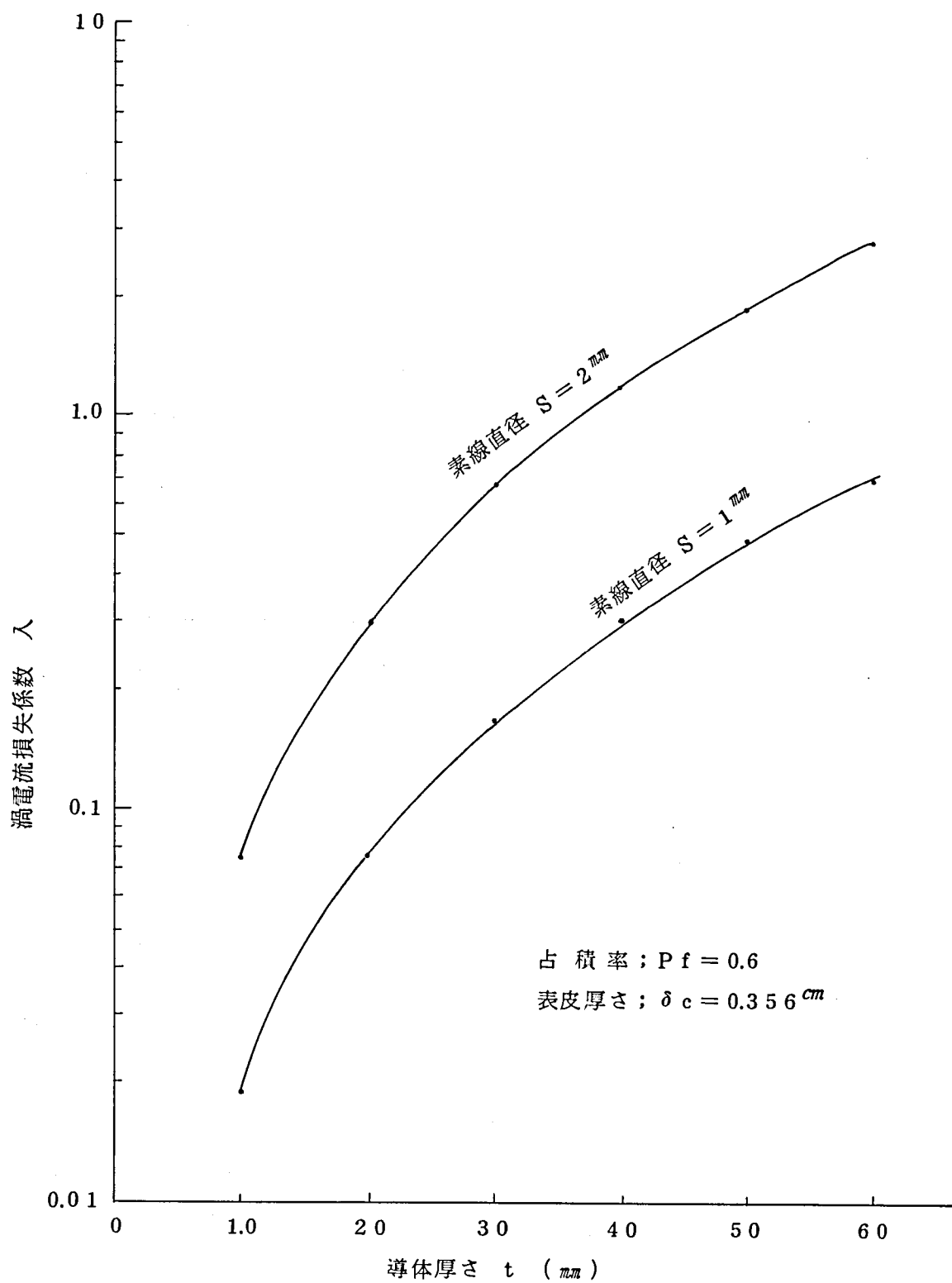
δ_c と同程度の導体厚さを持つ導体の単位体積当りの渦電流損 P_v は

$$P_v = \frac{(B \omega S)^2}{32 \rho_c} \times 10^{-10} \text{ (W/cm}^3 \text{) } \dots\dots\dots (2.2)$$

ここに $\omega = 2 \pi f$, S ; より線の素線直径 (cm)

ρ_c ; 固有抵抗 ($\Omega \text{ cm}$), B ; 磁束密度 (Gauss)

導体単位長さの総損失を求めるためには B^2 を導体断面に互って平均化しなければならない。内部に大きい冷媒流路を持ち導体厚さの薄い導体では、導体厚さを N 等分すると内側から n 番目の層の磁束密度 B_n は



第 2.3 図 導体厚さの過電流損に与える影響

$$B_n = B_{m\ n} / N \dots\dots\dots (2.3)$$

B_m は導体電流 I により与えられる最大磁束密度で次式で与えられる。

$$B_m = \mu_0 \sqrt{2} I / 2 \pi r \dots\dots\dots (2.4)$$

ここに I ; 電流 (Amp) , r ; 導体半径 (cm)

導体の平均磁束密度を B_{av} とし B^2_{av} は (2.3) 式により

$$\begin{aligned} B^2_{av} &= \sum_{n=1}^N B_n^2 / N \\ &= B_m^2 / 3 \dots\dots\dots (2.5) \end{aligned}$$

(2.2) , (2.4) , (2.5) 式の関係より導体の単位長さ当りの損失 P_c は

$$P_c = \frac{I^2 \rho_c}{A} \left\{ 1 + \frac{(A \omega S)^2 \times 10^{-18}}{12 (\rho_{cr})^2} \right\} \quad (W/cm) \dots\dots (2.6)$$

ここに A ; 導体断面積 (cm^2)

ρ_c を小さく A を大きくすると P_c 中の直流抵抗損が小さくなるが渦電流損は逆に大きくなる。(2.6) 式の2項は渦電流による直流抵抗損の増加分でこれを渦電流損失係数 λ と置き (2.1) 式の関係で書き直すと次式が得られる。

$$\lambda = \frac{(A \omega S)^2 \times 10^{-18}}{12 (\rho_{cr})^2} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$= \frac{(Pf t S)^2}{12 \delta_c^4} \dots\dots\dots (2.8)$$

ここに $A = Pf \cdot 2 \pi r_m \cdot t$, $r_m \doteq r$, r_m ; 平均導体半径 (cm)

Pf ; 占積率 , t ; 導体厚 (cm)

(2.8) 式より λ を増加させないためには導体厚 t と素線径 S を小さくする事が必要である。従って中空導体を用いる事が有効となり中空部は冷媒の流路として利用される。(2.7) , (2.8) 式は電流が導体断面一様に流れると仮定した式で、素線の絶縁をシトランスポーズを行ったより線で近似的に成立する。なおアルミの場合には表面の酸化皮膜が素線絶縁の働きをする事^{3.4)}が知られている。(2.7) 式より液体窒素冷却のアルミ導体で $\delta_c = 0.356 \text{ cm}$ の場合に、導体厚と λ の関係を求めて第2.3図に示した。素線径 S と導体厚 t が増すと λ が急に大きくなる事を示している。

§ 2.3 電気絶縁

極低温ケーブルを用いて経済的な大容量送電を実現させるためには、送電圧は超電導ケー

ブルの様に、電流密度を大きく出来ないで超高压を採用しなければならない。従って絶縁体の電気特性は極低温で超高压に耐え更に冷凍機の熱負荷を軽減させるために低誘電体損失のものでなければならない。一方機械的特性として一般に固体絶縁材料は極低温では脆性が増すので常温とのヒートサイクルにおける熱収縮歪や事故電流による電磁力に十分耐える材料でなければならない。

< 2.3.1 > 電気絶縁方式

電気絶縁の構成方式としてテープ巻き絶縁方式とスペーサ絶縁方式に大別される。

テープ巻き絶縁方式⁵⁾は、より線導体をテープ巻き絶縁したケーブルコアを断熱管路に引き入れ、液化ガス、低温ガス等の冷媒で含浸絶縁するか、或は真空中で絶縁するもので真空絶縁の場合には導体内を冷媒で冷却する。この構造のケーブルコアは従来の製造設備で長尺のケーブルコアが製造出来て工事現場まで運搬出来るので布設工事が容易になる。又電気特性はOFケーブルと類似の積層含浸構造であるので安定していると考えられるが、誘電率と誘電体損失はテープ材の影響を受けて比較的大きくなる。

一方スペーサ絶縁方式は導体をスペーサで断熱管路中に支え空間を液化ガス、低温ガス、又は真空等⁶⁾で絶縁するもので管路気中ケーブルと類似の構造である。導体がリジット型であるので短尺でしか製造し運搬する事が出来ず接続ヶ所が増加する。耐電圧特性にスペーサーの材質、構造及び塵埃等が大きい影響を与える。それ故接続工事は極めてクリーンな雰囲気で行わねばならない。しかし外径の制限が無く誘電率と誘電体損の小さいケーブル⁷⁾が製造可能となる。

両者を比較するとテープ巻き絶縁方式で冷媒含浸構造が超高压ケーブルの電気絶縁方式として安定していて従来技術で実現可能と考えられる。それ故 § 2.3 ではこの絶縁方式をとりあげ検討を進める。

< 2.3.2 > 液化ガスの特性

冷媒として使用可能な液化ガスは液体ヘリウム、液体水素、液体窒素等である。これ等の物理特性を絶縁油及び空気と比較して第 2.2 表⁸⁾に示す。

これ等のガスは極低温の液体から室温のガスに至る間で Clausius-Mossotti⁹⁾ の式が成立し誘電率は密度で変化する。第 2.2 表より液化ガスの誘電率は絶縁油に比較して小さいのでケーブルの静電容量を小さく出来るが積層絶縁のギャップの電位分担は大きくなる。誘電正接には電界依存性があり、例えば液体窒素で 2 KV/mm で 10^{-6} 以下と極めて小さいが 4 KV/mm で 10^{-5} 、 10 KV/mm で 10^{-4} と急激に大きくなる¹⁰⁾。これは液体中の荷電粒子の移動

や電界中の気泡のコロナ放電によるものと考えられる。絶縁破壊特性は液体ヘリウムの破壊¹¹⁾特性が絶縁油より劣る他は液体水素、液体窒素とも絶縁油と同等以上の値が得られている。

なおこれ等の液体は冷媒として過冷却状態で、ヘリウムの場合には超臨界の加圧状態で用いられるので、加圧により気泡の発生が押えられ破壊電圧が上昇する事が知られている。冷媒としての安全性と経済性だけでなく液体絶縁体としてこれ等のガスの中、液体窒素が秀れている。

< 2.3.3 > 液体窒素の絶縁耐力

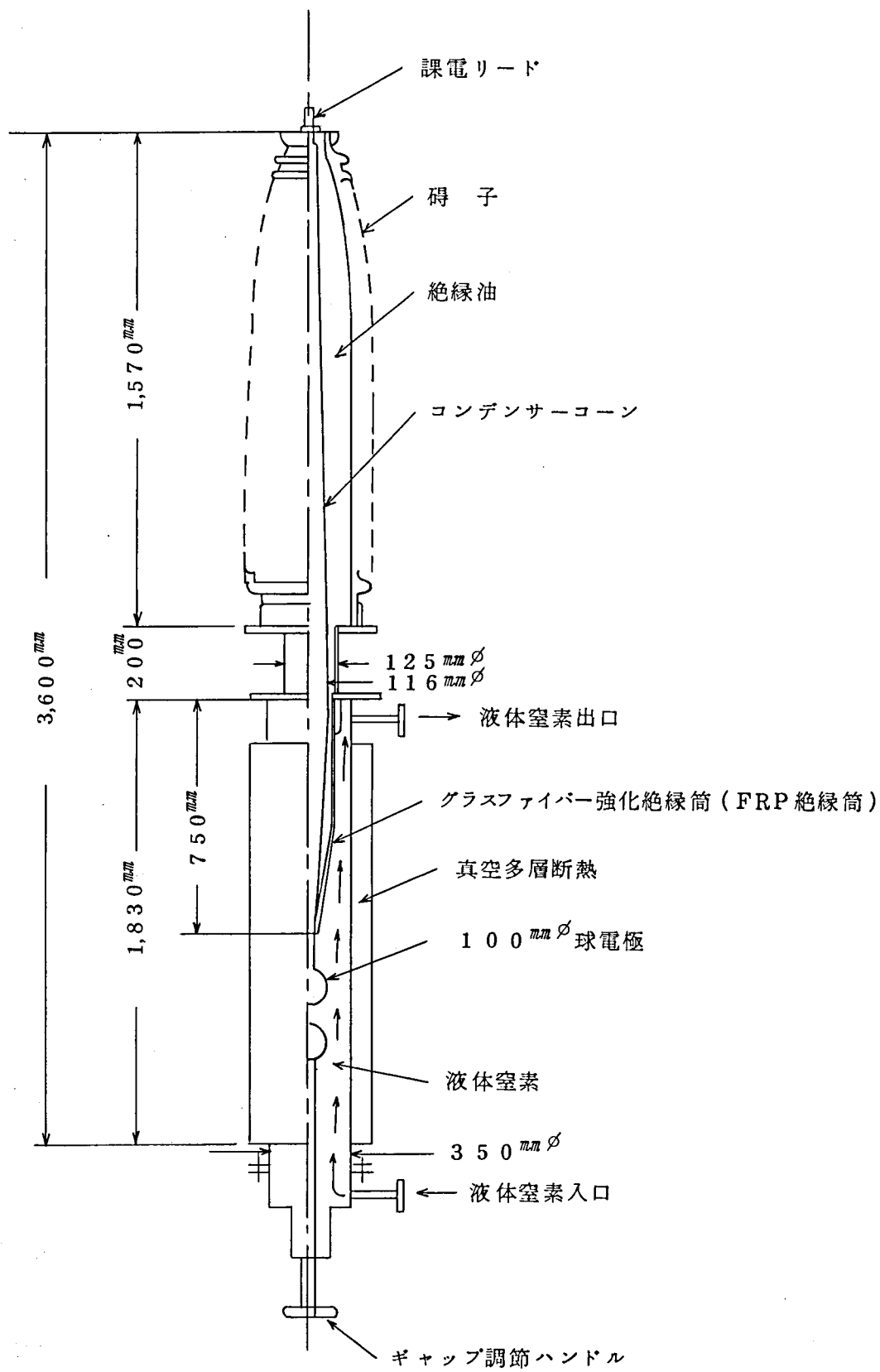
液体窒素が超高圧極低温ケーブルの冷媒としてだけでなく液体絶縁体として使用可能であるかを検討する。第 2.4 図は液体窒素の絶縁破壊特性を知るための試験装置である。真空多層断熱を行った内径 350 mm ϕ のステンレス製圧力容器の中に 100 mm ϕ の黄銅製電極をセットし下部のハンドルで電極間隙が変えられる様になっている。内部の液体窒素の圧力は外部からポンプで加圧して自由に制御する。電圧の上昇は交流破壊で 10 KV/min, 衝撃破壊では 20 KV/3 回とした。液体窒素の圧力と電極間隙を変えた場合の破壊結果を第 2.5 図, 2.6

第 2.2 表 液化ガスの物理特性

液化ガス	温 度 K	誘 電 率 ϵ	密 度 g/cm^3	粘 度 $\mu poise$	比 熱 $cal/g^{\circ}C$	蒸発潜熱 cal/g
ヘリウム	4.21	1.047	0.125	31	1.08	6
水 素	20.4	1.231	0.071	142	2.34	1.08
窒 素	77.3	1.431	0.881	1,600	3.35	47.6
絶 縁 油	273 370	2.22 2.12	0.900 0.835	45×10^4 11×10^4	0.425 (30°C)	
空 気 760mmHg	273 293	1.00	0.001 0.001	171 184	0.24	

¹²⁾ 図に示した。交流, 衝撃破壊とも圧力が 5 Kg/cm²G までは圧力飽和特性は見られない。特に交流破壊では衝撃破壊に比して圧力効果が大きい。この理由の一つに交流破壊の場合には全路破壊に至る前に射突電離により液体がガス化しそれが破壊するため、圧力が高い程ガス化が抑制されしかも過冷却となるために一層ガス化が妨げられるためと考えられる。一方衝撃破壊の場合はガス化の余裕が少いまま直接破壊するので圧力効果が小さいと考えられる。しかしそれでもなお、絶縁油の衝撃破壊よりは圧力効果が大きい。

電極間隙 d と破壊電圧 V の関係は交流, 衝撃破壊とも



注 液体窒素の流れを矢印で示す。

第 2.4 図 液体窒素耐電圧装置

$$V = C_b d^{0.8} \text{ --- (2.9)}$$

が得られる。ここに V ; 破壊電圧 (KV) , C_b ; 常数 例 : 圧力が $3.5 \text{ Kg/cm}^2\text{G}$ の場合

d ; 電極間隙 (mm)

交流破壊 $C_b = 5.6 \text{ KV/mm}$

衝撃破壊 $C_b = 11.0 \text{ KV/mm}$

以上の結果より液体窒素は絶縁油と同等以上の絶縁耐力を持っていて極低温ケーブルの冷媒としてだけでなく液体絶縁体としても十分使用出来る事が判る。

< 2.3.4 > テープ材料の誘電特性

a) 誘電特性

ポリエチレン, ポリプロピレン, テフロン等の永久双極子を持たない無極性の高分子の誘電率は, 常温から極低温までの広い温度範囲で変化は殆んどなく 2.2 程度の小さい値である。一方セルローズ, マイラ, ポリアミド等の有極性高分子の誘電率は, 常温では比較的大きく 3.5 以上であり冷却されるに従って双極子の配向の凍結のために次第に小さくなるが 4 K でも ¹³⁾ 2.5 以上である。

誘電正接は無極性高分子では広い温度範囲で $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度の非常に小さい値を示す。有極性高分子でも常温より極低温になるに従って, イオン伝導と双極子の回転が次第に凍結されて小さくなり, 150 ~ 250 K のガラス転移領域のピークを越えると極低温ではピーク値の $1/10$ の ¹⁴⁾ 10^{-3} 程度になる。

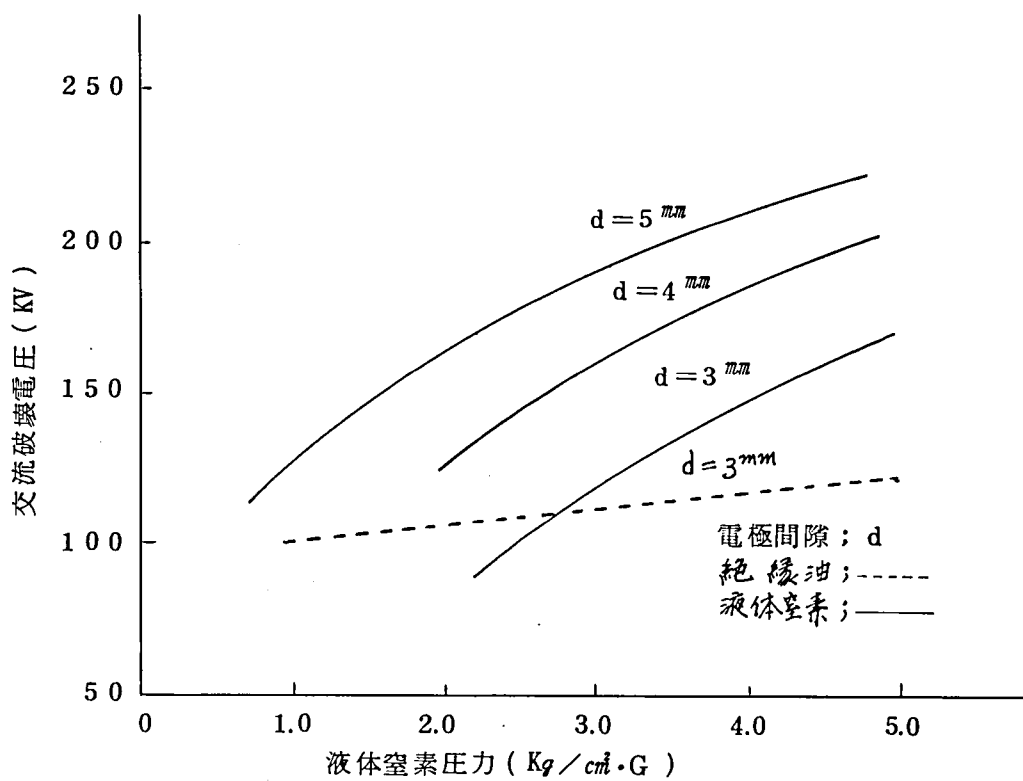
b) 絶縁破壊特性

絶縁破壊の温度依存性は一般に有極性材料では低温になる程大きく破壊値が高くなるが無極性材料では変らない。テープ絶縁材料では積層含浸状態で使用されるのでテープ間のギャップの媒質の放電の影響を受け, 同一温度でもガス中よりも液体中の方が高く, 又液体ヘリウムよりも液体窒素の方が高くなる。なおこれ等の媒質に圧力を加えると放電が抑制されて破壊電圧が上昇する。¹⁵⁾

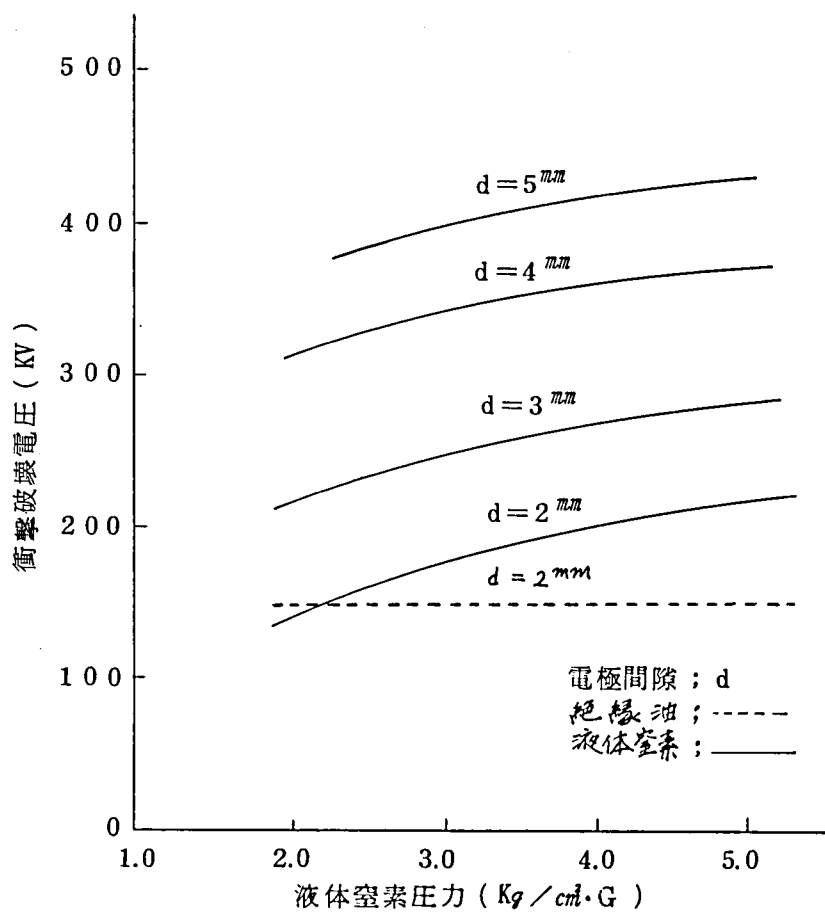
< 2.3.5 > 液体窒素含浸テープ材料の破壊特性

液体窒素冷却極低温ケーブルのテープ絶縁材料を選定するために, 各種テープによる課電試料 (その 1) の交流破壊電圧を求めた。

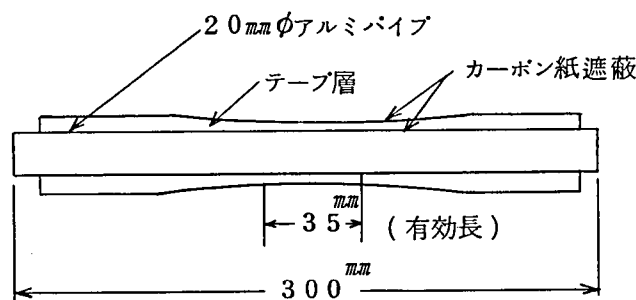
試料は第 2.7 図のように $35 \sim 250 \mu\text{m}$ 厚, 巾 $20 \sim 25 \text{ mm}$ のテープを 20 mm ϕ のアルミパイプ上に 4 層巻きし導体側と接地側をカーボン紙で遮蔽を行ったもので試料の有効長は 35 mm である。これを液体窒素の容器に入れて課電を行ったが, 含浸を十分行うために容器を真空引してから窒素ガスで真空を破り次に $5 \text{ Kg/cm}^2\text{G}$ の液体窒素圧力で 30 分間の加圧を



第 2.5 図 交 流 破 壞 特 性



第 2.6 図 衝 撃 破 壞 特 性



第 2.7 図 課電試料 (その 1)

行った後常圧に戻して課電した。なお比較のために同構造の課電試料の油浸状態での破壊電位¹⁶⁾も求めた。電圧上昇速度は 0.5 KV/sec で結果を第 2.8 図に示した。液体窒素含浸テープ材の交流破壊電位は、ほぼ油浸の場合と同程度になっている。フィルム状試料のポリプロピレン、DFD 2005、ハイゼックスは高い破壊電位を示しているが、テープ枚数を増すと破壊電位は減少するものと考えられる。

< 2.3.6 > 液体窒素含浸ポリエチレン不織布課電試料の破壊特性

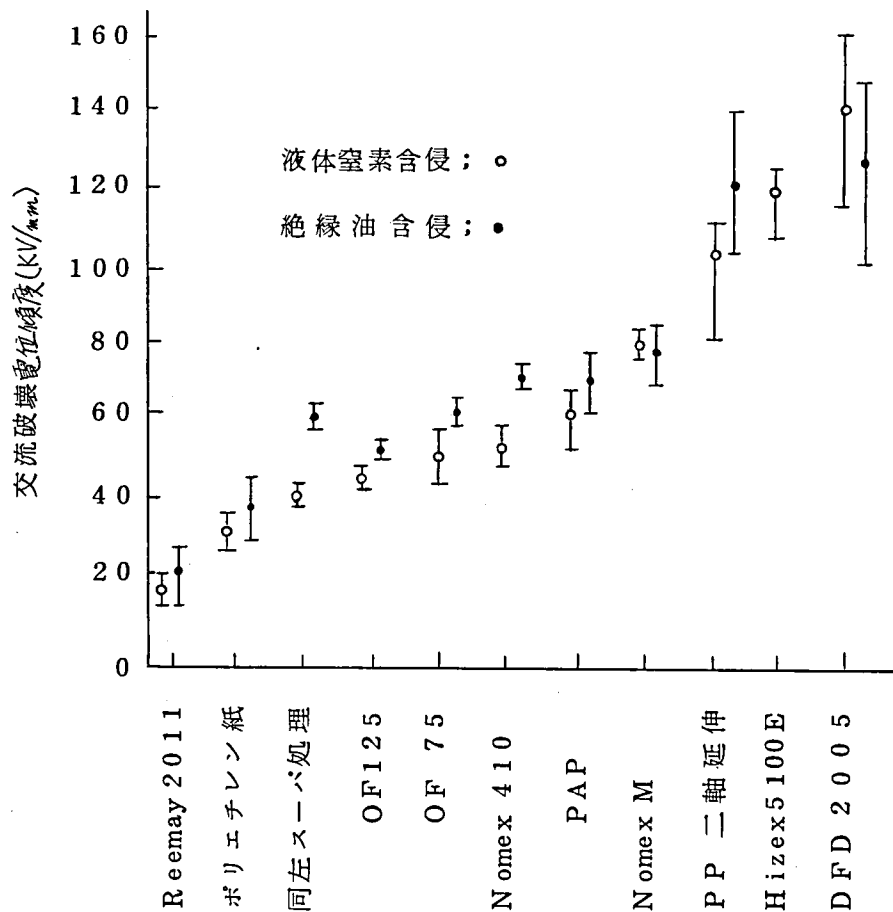
ポリエチレン不織布紙 (商品名 TYVEK 以下ポリエチレン紙) はスーパーカレンダー掛けを行い気密度を上げると、液体窒素の含浸下で第 2.8 図に示したようにクラフト紙 (OF 125, OF 75) と同程度の破壊特性が得られる。その上誘電特性も $\epsilon = 1.8$, $\tan\delta = 10^{-3}$ と秀れているので有望な極低温絶縁材料と考えられる。それ故液体窒素で含浸したポリエチレン紙課電試料の絶縁破壊特性を導体遮蔽の効果、テープ厚さ、液体窒素の圧力について更に詳細に検討した。

課電試料 (その 2) の構造は第 2.9 図のように第 2.7 図の構造よりも課電部の有効長を 35 mm より 200 mm に伸ばし、端末破壊を防ぐために両端にクラフト紙で補強絶縁を行い片端に $40 \text{ mm} \phi$ の球電極を取り付けた。

実験に使用した容器を第 2.10 図に示す。液体窒素を封入した圧力容器の中に課電試料を収容して課電出来る構造になっている。この圧力容器は大気圧下の液体窒素の中に浸されて約 77 K に冷却されるので内部の圧力を調節すると過冷却の液体窒素の雰囲気が出来上がる構造になっている。

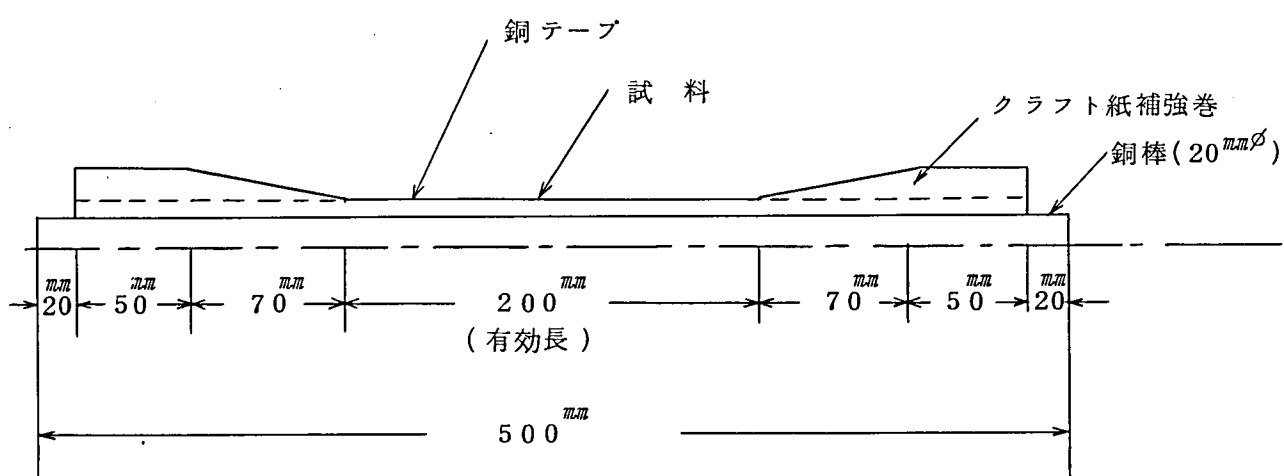
a) 導体遮蔽と液体窒素圧力の交流破壊特性に及ぼす効果

導体遮蔽としてカーボン紙を採用し、液体窒素の圧力を変えて課電試料の交流破壊特性を求めた。実験に使用したポリエチレン紙の物理特性を第 2.3 表に試料の構造を第 2.4 表

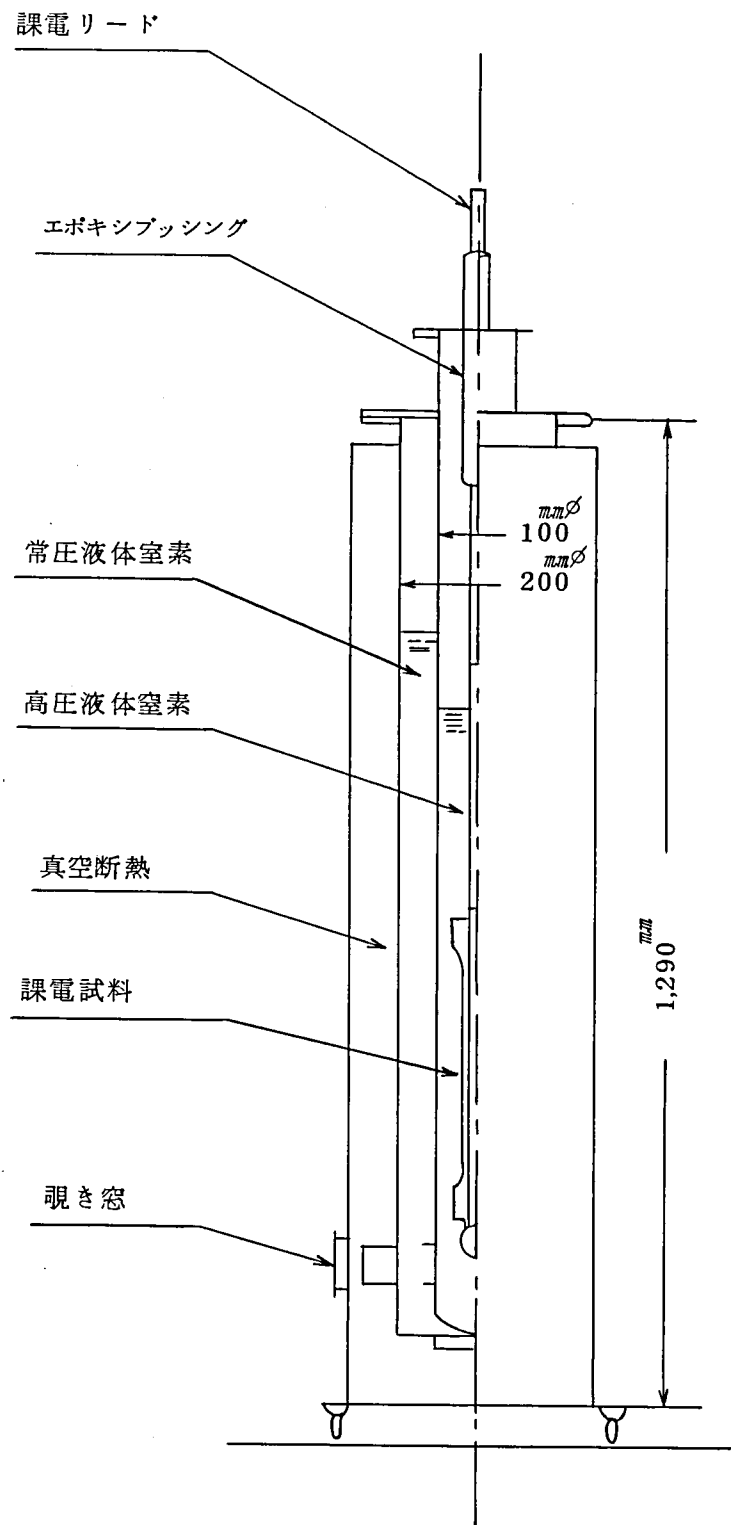


第 2.8 図 各種テープ材料の交流破壊特性

注 Reemay 2011 ; ポリエステル不織布
 OF125, OF75 ; クラフト紙
 Nomex 410 ; ポリアミド不織布
 Nomex M ; ポリアミド不織布
 PAP ; ポリカーボネイトコーティングポリエステル不織布
 PP ; ポリプロピレン
 Hizex5100E ; 高密度ポリエチレン
 DFD 2005 ; 低密度ポリエチレン



第 2.9 図 課電試料 (その 2)



第 2.1 0 図 課電試料耐電圧試験装置

に示す。スーパーカレンダ処理を行ったポリエチレン紙の気密度は同じ厚さのクラフト紙と比較して約倍の大きさであり、一方伸びも縦方向で20倍以上大きい値を示している。第2.4表の試料1と2は銅棒に対するカーボン紙の遮蔽効果を、試料3と4は電極表面の凹凸を模擬した穴あき銅テープに対するカーボン紙の遮蔽効果を知るためのものである。

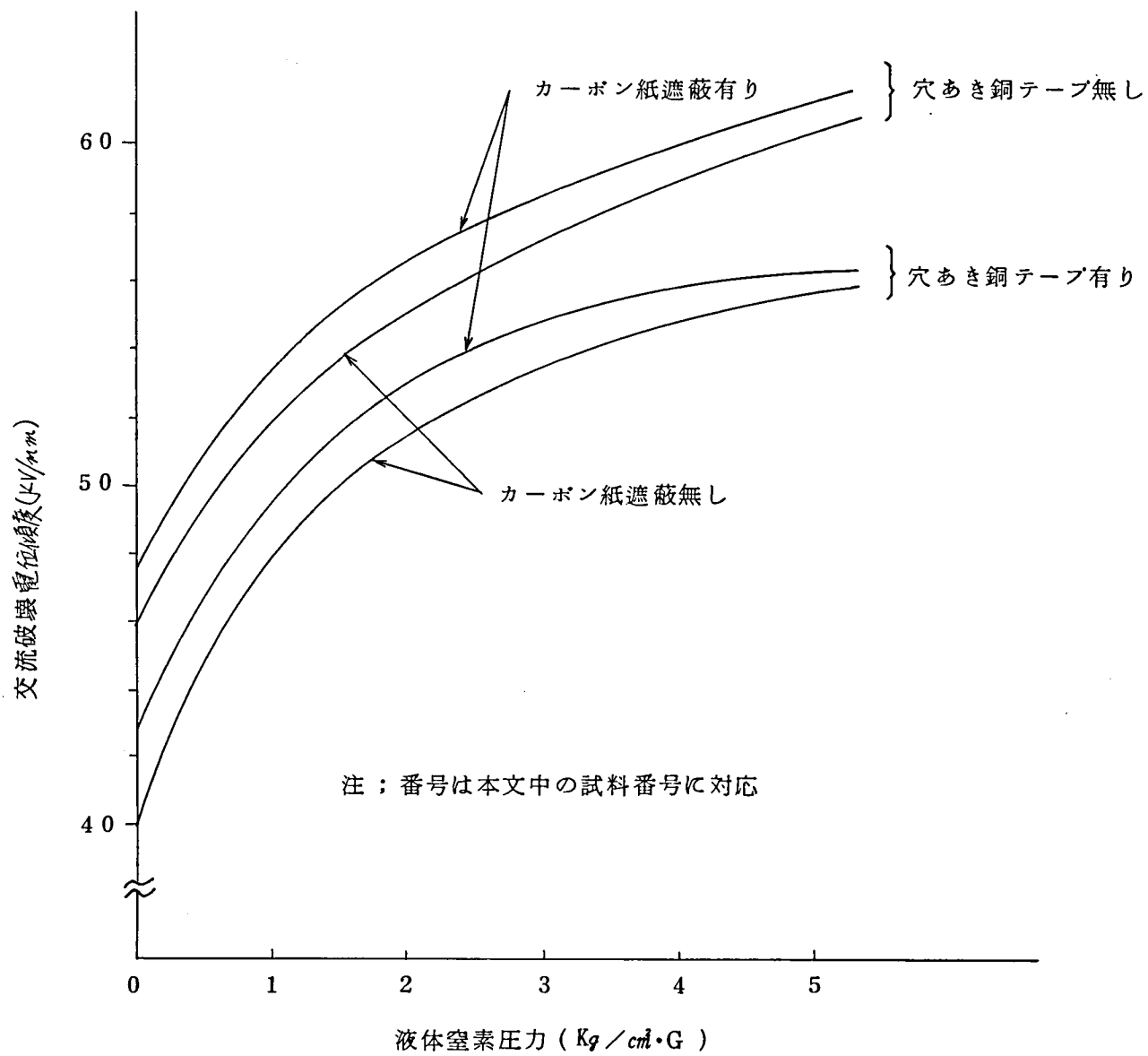
破壊試験結果を第2.11図に破壊特性に及ぼす圧力の効果を油浸紙と比較して第2.12¹⁶⁾図に示した。電極表面に凹凸を形成する穴あき銅テープは交流破壊電位~~破壊電位~~を約10%低下させる。カーボン紙の遮蔽効果は殆んど認められない。液体窒素の圧力を上げると交流破壊電位~~破壊電位~~がかなり上昇するが油浸紙と油圧の場合に比して飽和傾向が大きく、カーボン紙を用いた試料は特に著しい。

第2.3表 ポリエチレン紙の物理特性

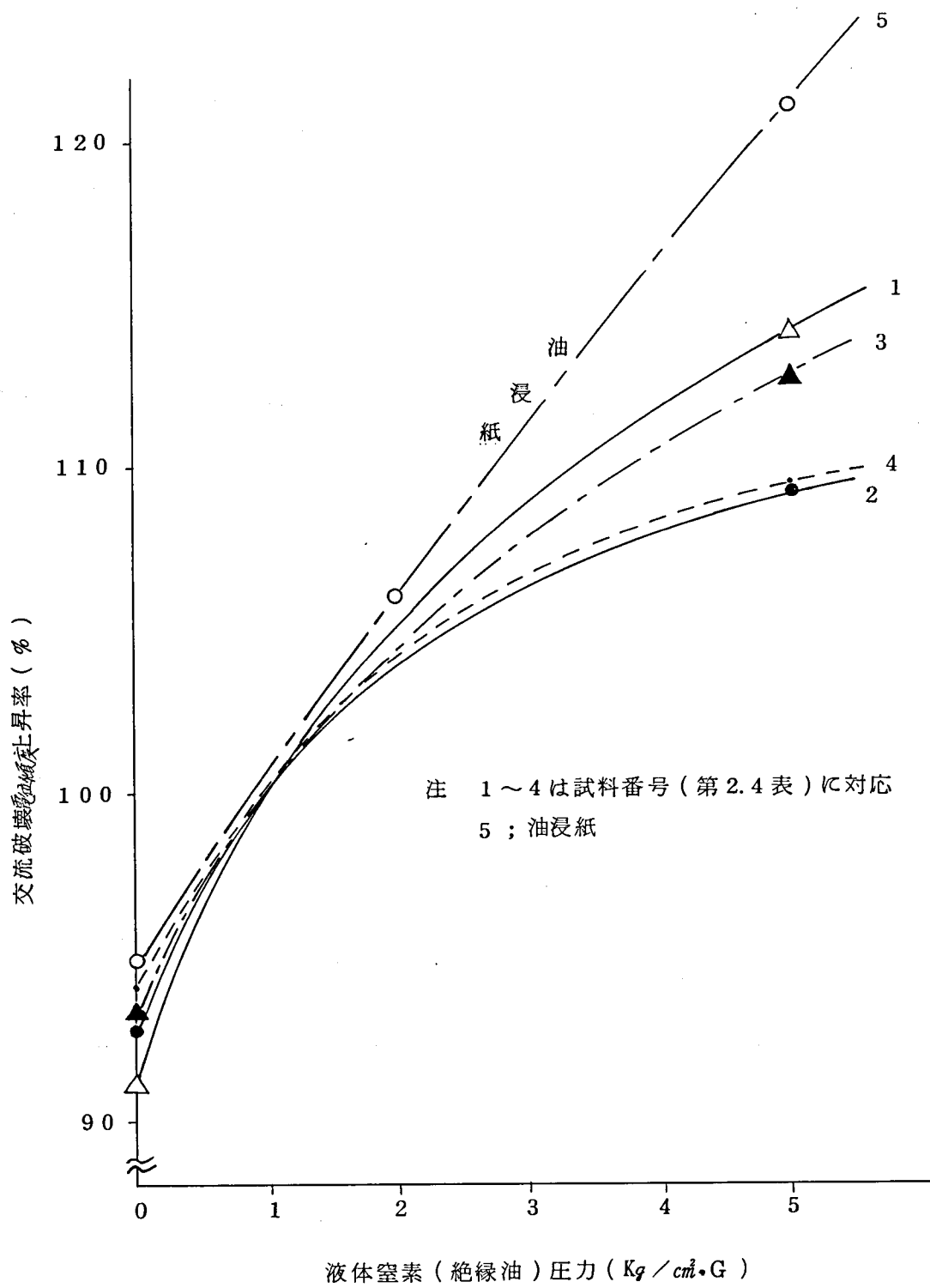
項 目		110 μ 紙
平均厚さ (μ m)		110
密 度 (g/cm^3)		0.71
引張り強さ	縦 (Kg/15mm)	12.0
	横 (")	11.9
伸 び (%)	縦	37.5
	横	24.5
気 密 度 (sec/100cm ²)		6,100

第2.4表 ポリエチレン紙課電試料の構造

試料番号	1	2	3	4
内部電極	銅 棒 (20mm ϕ)			
内部遮蔽	なし	カーボン紙 0.1mm \times 2枚	穴あき銅テープ 0.1mm \times 1枚	穴あき銅テープ + カーボン紙 0.1mm \times 2枚
絶縁体	ポリエチレン紙 (0.5mm)			
外部遮蔽	なし	カーボン紙 0.1mm \times 1枚	穴あき銅テープ 0.1mm \times 1枚	カーボン紙 0.1mm \times 1枚 穴あき銅テープ
外部電極	銅 テ ー プ (0.1mm)			



第 2.1 1 図 課電試料交流 (50Hz) 破壊特性



第 2.12 図 交流破壊電位傾度上昇率

b) ポリエチレン紙の厚さと液体窒素圧力の破壊特性に与える効果

ポリエチレン紙の厚さを $75\mu\text{m}$, $125\mu\text{m}$ と変えて第 2.9 図の課電試料を作り液体窒素の圧力を変化させて交流及び衝撃電圧の破壊特性を求めた。実験結果を第 2.13 にポリエチレン紙の物理特性を第 2.5 表に示した。

第 2.5 表 ポリエチレン紙の物理特性

項 目		125 μ 紙	75 μ 紙
平均厚さ (μm)		123	77
密 度 (g/cm^3)		0.63	0.73
引張り強さ	縦 ($\text{Kg}/15\text{mm}$)	13.8	7.1
	横 (")	12.9	8.7
伸 び (%)	縦	27.0	20.8
	横	32.0	24.3
気 密 度 ($\text{Sec}/100\text{cm}^3$)		5,000~ 8,000	1,930

75 μ 紙の破壊¹⁷⁾特性は125 μ 紙に比して交流，衝撃破壊共，0～5 $\text{Kg}/\text{cm}^2\text{G}$ の圧力範囲で約10%大きい。交流破壊では圧力効果は4 $\text{Kg}/\text{cm}^2\text{G}$ まで飽和傾向が見られない。しかし衝撃破壊では1 $\text{Kg}/\text{cm}^2\text{G}$ 以上で飽和傾向が大きい。この現象は油浸紙の場合も同様に衝撃破壊の油圧の効果は認められない。破壊¹⁷⁾特性を油浸紙と比較すると衝撃破壊は125 μ 紙で20%，75 μ 紙で25%程度低く又交流破壊は同程度になっている。

§ 2.4 熱 絶 縁

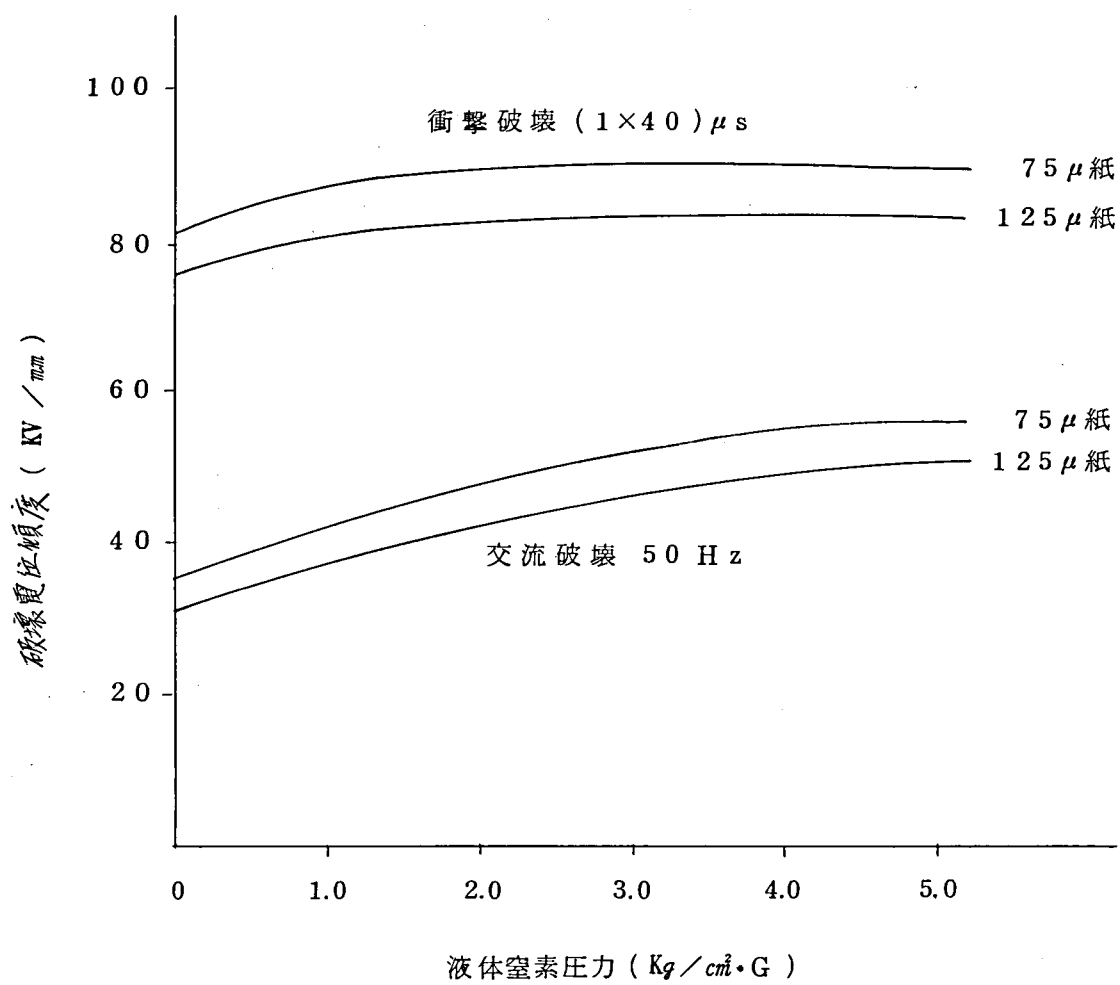
液体窒素冷却極低温ケーブルでは導体温度を過冷却の液体窒素温度に維持しなければならず，そのための冷凍機の効率は1/6～1/9程度であるので熱侵入を小さく押える必要がある。長尺のケーブルをいかに効率良く極低温に維持するかは経済的な送電を実現させるために重要な課題である。

熱絶縁の方式として考えられるものを大別すると真空を利用するものと利用しないものに分けられる。これを各方式の断熱層の熱伝導率と共に第 2.6 表¹⁸⁾に示す。

< 2.4.1 > 真空を使用する熱絶縁方式

a) 高真空熱絶縁

極低温と常温との空間を $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Torr の高真空に排気し気体圧力を分子流領域ま



第 2.1 3 図 ポリエチレン紙の絶縁破壊 の圧力特性

第 2.6 表 熱絶縁の種類

熱 絶 縁 の 種 類		熱伝導率 ($\mu W/cmK$)
真空を利用 する方式	高真空 熱絶縁	20 ~ 80
	粉末真空 //	8 ~ 70
	真空多層 //	0.1 ~ 0.5
真空を利用 しない方式	粉 末 //	500
	フォーム //	500

で下げて気体分子による熱伝達を小さくした熱絶縁方法である。しかし高真空だけで良好な熱絶縁を得る事は困難で相対する壁面を研磨するか渡金して輻射率を小さくする事が必要になる。長尺の線路を高真空に保つのはかなり困難な事である。

b) 粉末真空熱絶縁¹⁹⁾

気体分子の平均自由行程が容器の壁間距離を越えると熱伝達は圧力の低下に比例して下るので粉末のような微粒子を空間に充填して真空引きすると、真空度が 10^{-2} Torr でも十分断熱効果が表れる。その上粉末を微粒子にする程、粉末間が点接触となり接触抵抗が増加する。粉末真空絶縁の伝熱の主成分は輻射伝熱であるのでこれを減らす目的で銅、アルミ等の金属粉を適当な割合で混入すると、熱伝導による伝熱成分は増加するが全体としての流入熱は減少する。粉体として一般にシリカ、パーライト等が用いられる。この方式は系の真空排気に困難さが残っている。

c) 真空多層熱絶縁²⁰⁾

極低温と常温との空間にシールド層を多層設けて空間を 10^{-2} Torr 以下の真空に保った熱絶縁方式である。この方式の伝熱の主成分は輻射伝熱でシールド板を n 層挿入すると輻射伝熱は $1/(n+1)$ に減じる事が出来る。シールド板の間にはスペーサを挟んでシールド板が接触するのを防止すると共にシールド層の密度をあげて熱遮蔽の効率を増加させる。熱伝導は輻射によるものとスペーサの伝熱によるものとに分けられ平板で近似すると次式で表わされる。

$$q_{SI} = \frac{\sigma A_i (T_H^4 - T_L^4)}{n(2/\epsilon_s - 1)} + \frac{k_s A_i (T_H - T_L)}{n t_s} \dots\dots\dots (2.10)$$

ここに q_{SI} ; 熱絶縁層からの侵入熱 (W), n ; シールド層数

$\sigma = 5.67 \times 10^{-12} W/cm^2 K^4$, Stefan-Boltzmann 定数

t_s ; スペーサの厚さ / 層 (cm)

k_s ; スペーサの熱伝導率 (W/cmK)

ϵ_s ; シールド層の輻射率, A_i ; 受熱面積 (cm^2)

T ; 温度 (K)

添字 H, L は高温側, 低温側を意味する。

(2.10) 式より n を増加すると q_{SI} は幾らでも小さくなるが実際には n の増加に対する q_{SI} の減少の度合は次第に小さくなり, 壁間が一定では層密度が増加しスペーサからの熱伝導が急速に増加するので n の最適値が存在する。普通 n は 10 層 / cm ²¹⁾ 程度にする。

同心円筒の場合の侵入熱の計算は輻射シールドの構造と層数が決定すると, 実験的に等価の熱伝導率 k_i を測定して次式で求める。

$$q_{SI} = \frac{2\pi(T_H - T_L)}{\frac{1}{k_i} \ln \frac{r_H}{r_L}} \dots\dots\dots (2.11)$$

ここに k_i ; 等価熱伝導率 (W/cmK), r ; パイプ半径 (cm)

第 2.7 表 ¹⁶⁾ に輻射シールドとスペーサの材質及び枚数を変化させて得た真空多層熱絶縁の等価熱伝導率の測定結果を示した。測定装置を第 2.14 図 ¹⁶⁾ に示す。両端に熱遮蔽を持った液体窒素タンクに試験用真空多層熱絶縁を行い侵入熱量を冷媒の気化熱と等しいとして気化したガスの量から熱伝導率を求めた。

層密度が 7 ~ 9 層 / cm でもスペーサにグラスベバ, 又はデキスタを使用すれば等価熱伝導率として $1 \mu W/cmK$ が得られる。ポリエステルネットの場合に見られるように層密度を 18 層 / cm から 46 層 / cm に増加しても特性は改善されないで適当な層密度があることが判る。

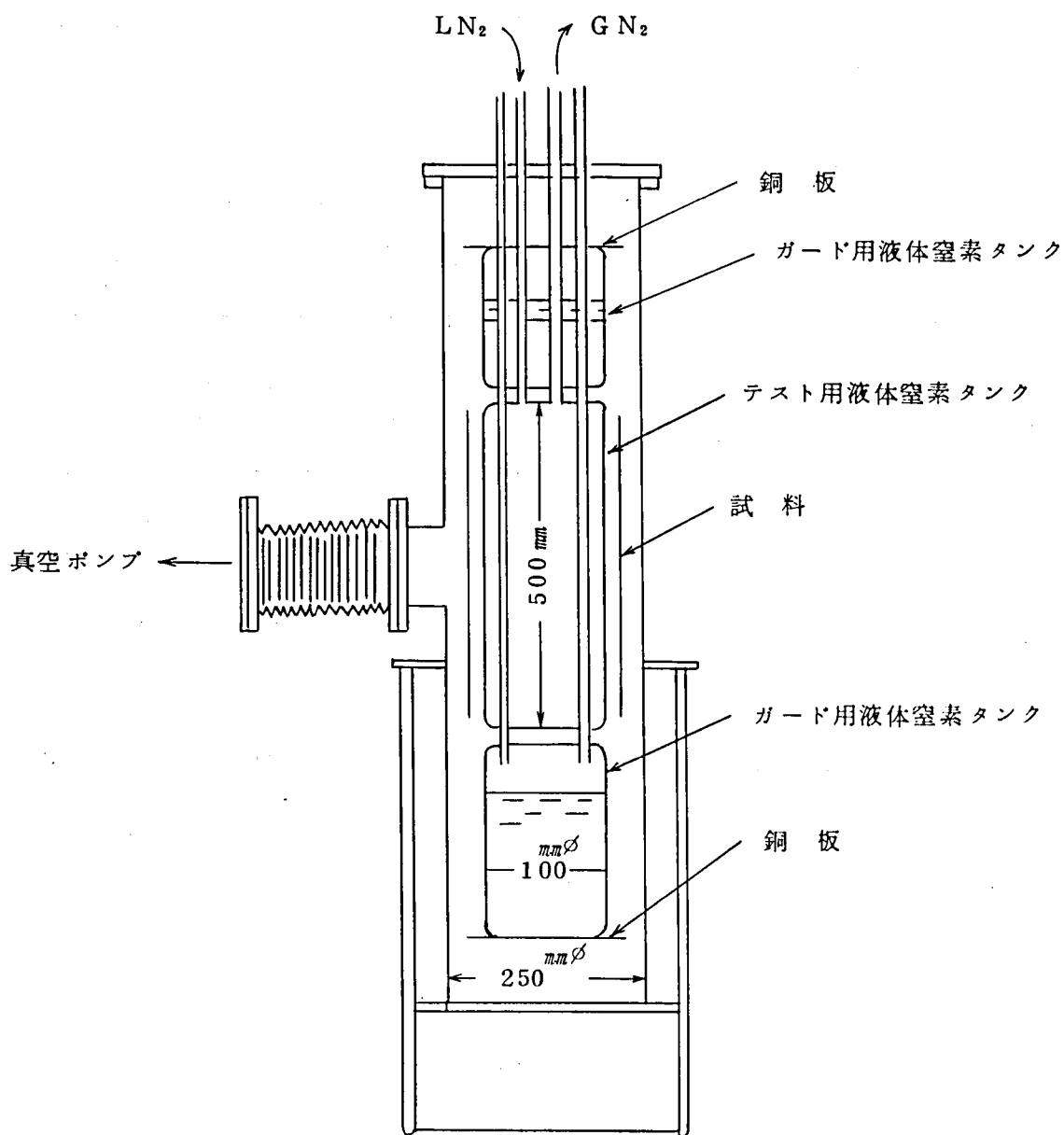
< 2.4.2 > 真空を使用しない熱絶縁方式

この方式は真空関係の設備費と運転費が不用になるが熱伝導率は第 2.6 表のように 500 $\mu W/cmK$ とかなり大きくなる。

a) 粉末熱絶縁 ²²⁾

この方式の熱伝導率は粉末真空熱絶縁に比して 1 ~ 2 桁大きくなる。伝熱の主成分はガスの対流であるので細い粉末を用いて粉末間の空間を出来るだけ小さくする必要がある。

一方水の熱伝導率は空気よりも 1 桁大であるので粉末の吸着水分は十分ベイクンして乾燥して置かねばならない。



第 2.1 4 図 真空多層熱絶縁の熱伝導率測定装置

b) フォーム熱絶縁²³⁾

この方式の代表的なものは硬質ウレタンフォーム熱絶縁である。フォーム熱絶縁では内部の空気の中、酸素が冷却され一部が液化してボイドの部分は真空になるため外気との間に圧力差を生じ水分がフォームの中に侵入する恐れがある。

拡散した水分はフォーム内部で水滴や氷になるが、これ等はフォームよりも1桁以上大きい熱伝導率を持つために熱絶縁性能を悪化させる。

第2.7 真空多層熱絶縁の測定結果

絶縁厚 mm	輻射シールド			スペーサ		層密度 n/cm	熱伝導率 $\mu W/cmK$
	材質	厚さ mm	層数	材質	厚さ mm		
43	アルミ蒸着 ポリエステル	0.009	77	ポリエステルネット	0.13	17.9	0.5
48	" "	"	88	ナイロンネット	0.17	18.3	2.0
43	" "	"	31	グラスベーパー	0.10	7.2	0.8
23	" "	"	20	デキスター	0.10	8.7	0.9
38	アルミ箔	0.01	173	ポリエステルネット	0.13	45.5	0.6
53	" "	"	85	ナイロンネット	0.17	16.0	2.0

(注) $10^{-4} \sim 10^{-7}$ Torr,

両壁温度 300~77 K

それで外気や水分の侵入を防ぐために防水する事や断熱材の厚さを結露しない厚さにする等の方法がとられる。

結露しないための熱絶縁層の厚さを求める。

外気を通して熱絶縁層の外側から侵入する熱量は連続であるので

$$q_{SI} = \frac{2\pi(T_H - T_L)}{\frac{1}{\alpha_{\infty} r_H} + \frac{1}{k_1} \ln \frac{r_H}{r_L}} = \frac{2\pi(T'_H - T_L)}{\frac{1}{k_1} \ln \frac{r_H}{r_L}}$$

これより

$$r_H \ln \frac{r_H}{r_L} = \frac{k_1}{\alpha_{\infty}} \frac{T'_H - T_L}{T_H - T'_H} \dots\dots\dots (2.12)$$

ここに T_H ; 外気温度 (K), T'_H ; 露点温度 (K)

α_{∞} ; 外気との熱伝達率 (W/cm^2K), r ; 熱絶縁層半径 (cm)

添字 H, L は高温側, 低温側を意味する。

(2.1 2) 式の関係より結露しない熱絶縁厚を求める事が出来る。なお一般には外気温度 3 0 ℃, 相対湿度 8 5 % で設計する。

§ 2.5 要 約

本章においては液体窒素冷却極低温ケーブルの構成要素である導体系, 電気絶縁系, 熱絶縁系について基礎実験を行い以下の結果を得た。

- (1) 導体材料として銅よりもアルミが秀れており, 液体窒素温度では純度と熱処理条件の影響は小さく, 固有抵抗は常温の約 $1/10$ が得られる。
- (2) 導体厚さと渦電流損の関係を求め, 内部に冷媒流路を持った中空導体が渦電流損に対して有利な事を示した。
- (3) 電極間隙 5 mm までの液体窒素の絶縁破壊の圧力特性を求め, 絶縁油と同レベルにある事を知った。
- (4) 電気絶縁方式ではテープ積層絶縁が電氣的に安定していて, 液体窒素で含浸したクラフト紙課電試料では, 油浸紙と同程度の交流破壊電圧が得られた。
- (5) 液体窒素で含浸したポリエチレン紙課電試料の破壊は, 交流破壊で油浸紙と同程度で, 衝撃破壊では油浸紙よりも 2 0 ~ 2 5 % 低い値であった。尚カーボン紙の遮蔽効果は認められなかった。
- (6) 熱絶縁方式では真空多層熱絶縁が, 他の熱絶縁よりもかなり秀れておりアルミ蒸着ポリエステルテープとデキスタを用いて, 1 0 層/cm の層密度で熱伝導率 $1 \mu W/cm \cdot K$ が得られた。

第 3 章 154 kV 極低温モデルケーブルの開発

§ 3.1 梗 概

前章で得られた実験結果及びその検討をもとにして、液体窒素冷却極低温ケーブルの可能性を知るために154 KV級の第1次モデルケーブルと第2次モデルケーブルを開発し、冷却実験と耐電圧試験を行う。すなわち、これにより冷却時の機械的問題として低温圧力容器とケーブルコアの熱収縮、及び冷媒に対するパッキングの材質と構造について検討し、更に154 KV級ケーブルコアと終端箱の熱的電気的基本問題を実験検討する。

先づ第1次モデルケーブルでは、従来型の154 KV級ケーブルを液体窒素で冷却し課電した場合にどのような問題が生じるかを観察することを目的としている。このためにOFケーブルと類似の構造を採用し、アルミより線導体、クラフト紙絶縁、アルミ被ケーブル上に真空多層熱絶縁層を設け更にアルミ被を行う。

次に154 KV第2次モデルケーブルでは第1次モデルケーブルを改良して熱的電気的不安定さを取除く事を狙い、低温圧力容器内にケーブルコアを収容し両端に極低温終端箱をとりつけた構造としている。ケーブルコアは600 mm²のアルミより線でその上に1.2 mm厚さにポリエチレン絶縁を行うが、表皮効果を軽減し冷却の際の熱収縮による長さ変化を生じない構造を開発している。

なお、第2次モデルケーブルの運転のために液体窒素の加圧循環装置の開発も行っている。

§ 3.2 154 KV第1次モデルケーブル

< 3.2.1 > ケーブルの構成

第1次モデルケーブルでは実際にケーブルを冷却した場合に生じる熱的電気的問題を1次オーダーで明らかにする事を目的とした。そのため、多少熱的電気的に不安定になっても問題の摘出把握に便利な構造とし有効長1.2 mのケーブルを組立てた。

a) ケーブルコアの構造

ケーブルコアの構造を第3.1図及び第3.1表に示す。アルミより線中空導体上にクラフト紙絶縁を行いアルミ被を施してから真空多層熱絶縁層を設け、外部に更にアルミ被を行ったものでケーブルコアそのものに断熱性を持たせた。

クラフト紙は154 KV級OFケーブルに一般に使用される高密度脱イオン水洗紙でその特性を第3.2表に示した。

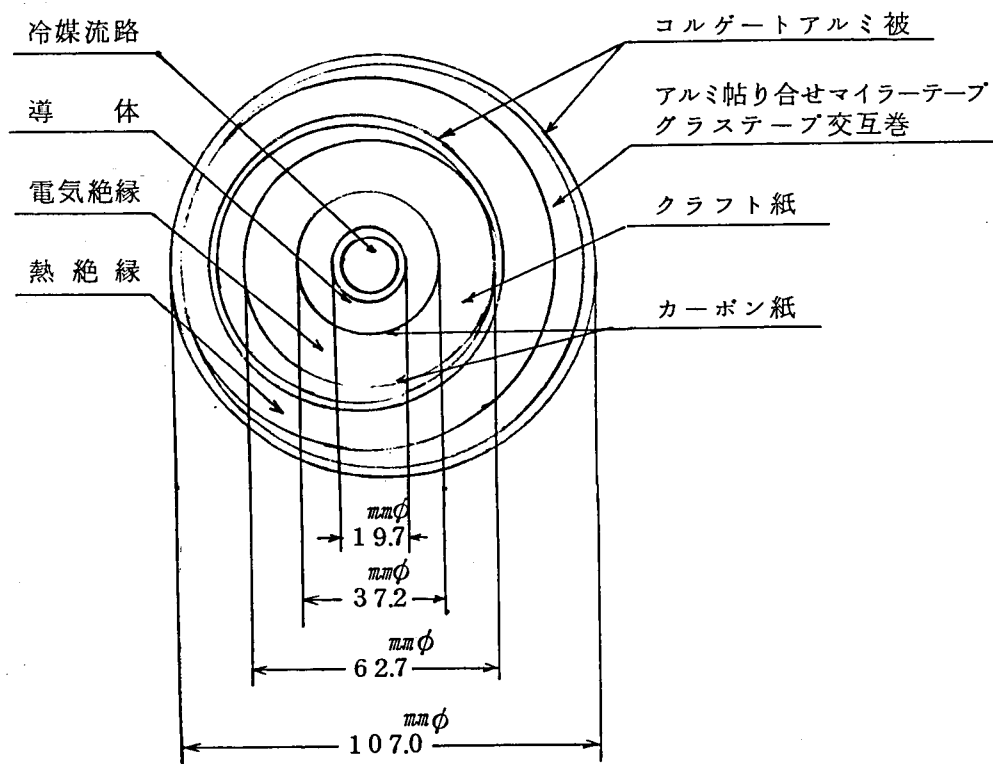
なおアルミ被は内外ともコルゲートして可撓性を持たせ冷却時の熱収縮を吸収すると共に内側では冷媒の流路を外側では断熱層の真空引のための空間を確保した。

b) 終 端 部

終端部はケーブルコアの末端をコンデンサーコーンで電界調整しそれをグラスファイバー強化絶縁筒（以下FRP絶縁筒）に封入し内部を液体窒素で加圧含浸冷却した。このFRP絶縁筒を更に片端は下部をフォーム断熱した磁器端子に他端はFRP断熱パイプに挿入し夫々の内部に液体窒素を流してFRP絶縁筒を冷却すると共に電氣的に絶縁する構造とした。終端部の構造を第3.2，3.3図に示す。終端部を組立てる前にFRP絶縁筒の極低温における機械的電氣的強度を調査した。先づFRP絶縁筒の基部を盲板で塞さぎ上部にはロッドを貫通させ夫々パッキングでシールして液体窒素による圧力試験を行った。パッキング材にテフロンを使用すれば、 $4.5 \text{ Kg/cm}^2\text{G}$ の圧力でも異常を生じなかったが、ゴム含浸アスベスト材は殆んどシール効果が無かった。このFRP絶縁筒の中に液体窒素を流し外部は空中に露出して交流耐電圧試験を行い初期電圧150KVから電圧上昇速度10KV/minにて250KVで外せんした。

第3.1表 154KV第1次モデルケーブル構造表

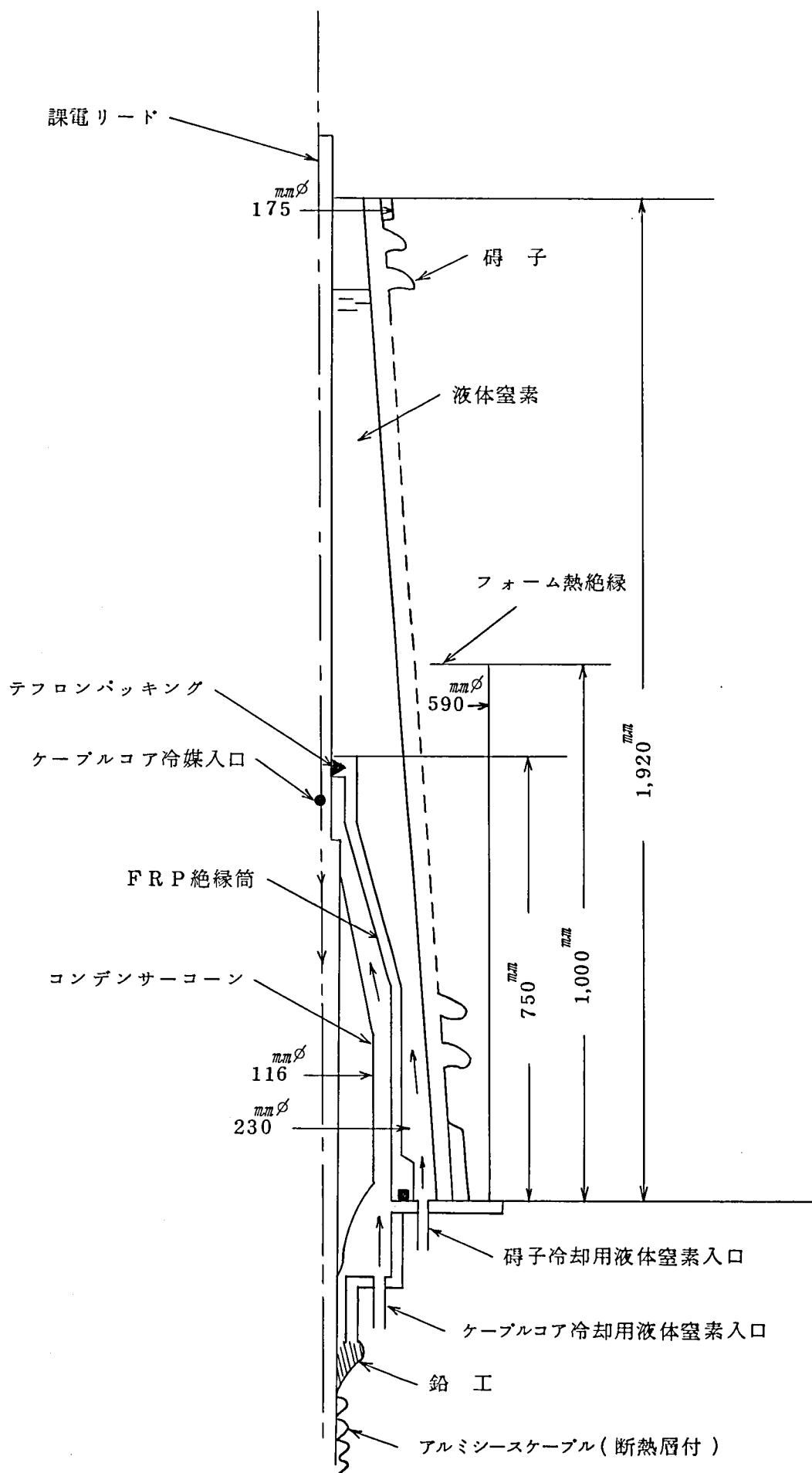
項 目	材 料	寸 法 (mm)	摘 要
スパイラル	亜鉛メッキ	I.D 18.0 O.D 19.7	冷媒流路
導 体	ECアルミ	156 / 2.2	同層より
外 径		37.2	
遮 蔽	カーボン紙	0.1 × 2 枚	
絶 縁	クラフト紙	0.075 × 48 枚 0.125 × 81	絶縁厚 1.25 mm
遮 蔽	カーボン紙	0.1 × 2 枚	
外 径		62.7	
アルミ被		1.9	コルゲート
熱絶縁層	アルミ帖合せ マイラーテープ グラステープ	0.1 > 0.1	交互巻 10 層
アルミ被		1.9	コルゲート
外 径		107	



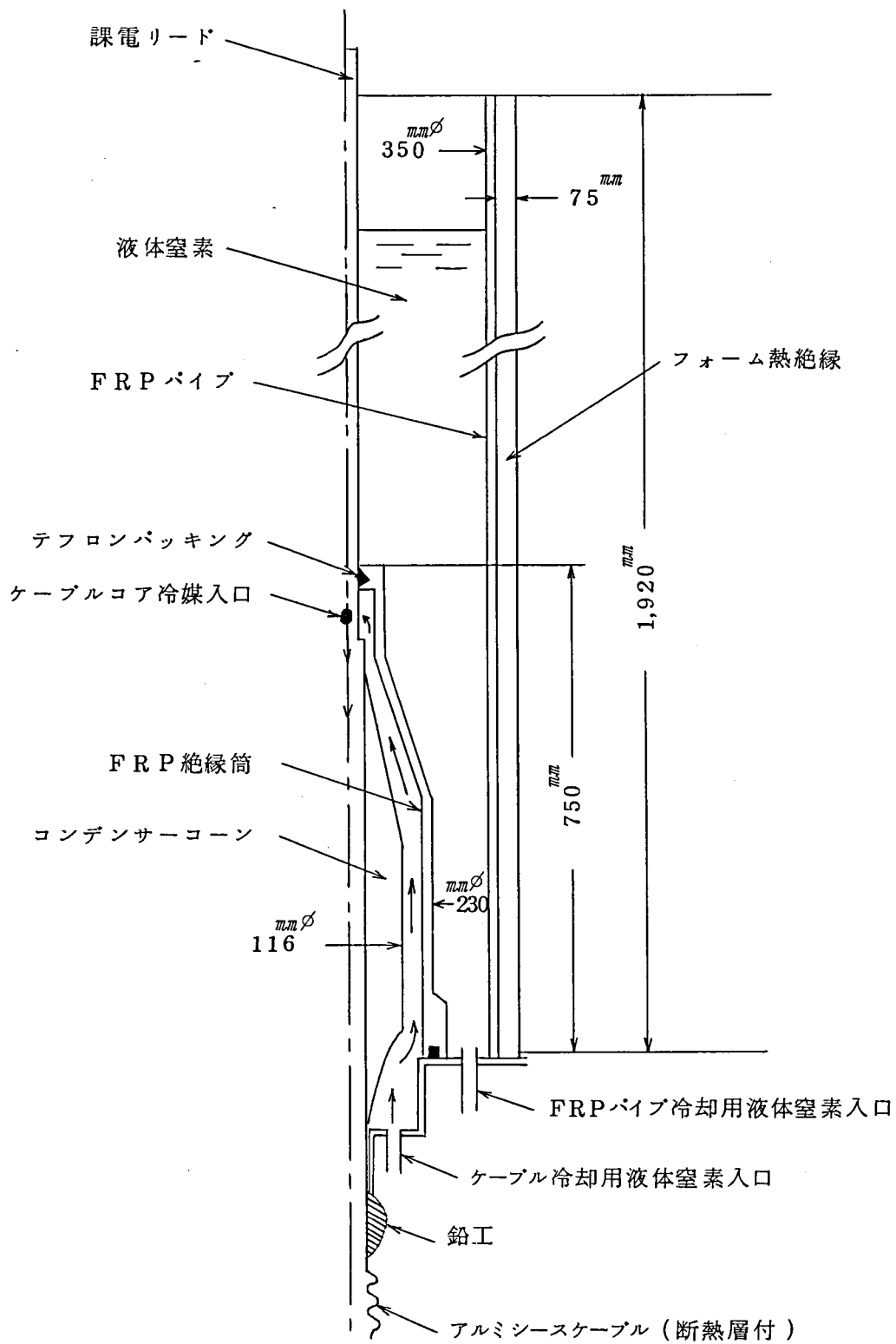
第 3.1 図 154 KV第 1 次モデルケーブルの断面

第 3.2 表 高密度クラフト紙の特性

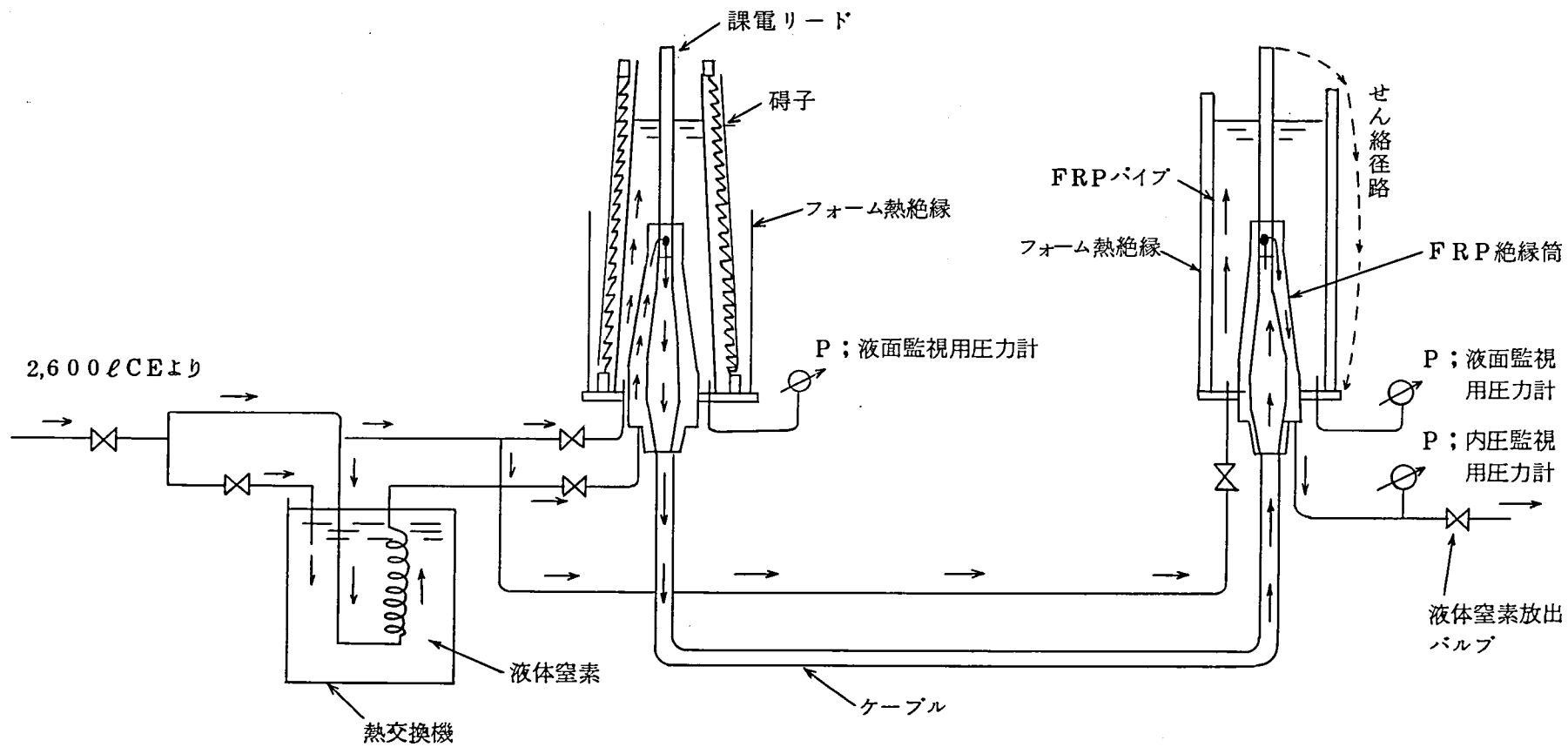
項 目		75 μ 紙	125 μ 紙
平均厚さ (μ m)		74	124
密 度 (g/cm^3)		0.95	0.86
引張り強さ	縦	15.0	18.2
	横	3.8	6.5
伸 び (%)	縦	3.0	3.0
	横	10.3	9.8
気 密 度 ($sec/100cm^3$)		2,300	500
$\tan \delta$ (%) (液体窒素含浸)		0.215	0.202
ϵ (")		2.74	2.62



第 3.2 図 磁器碍子終端部



第 3.3 図 FRP パイプ 終 端 部



注 液体窒素の流れを矢印で示す。

第 3. 4 図 冷却系統図

これ等の試験結果によりこのFRP絶縁筒は154KV級の極低温ケーブルに使用出来る事が判った。

c) 冷却系

極低温ケーブルの冷媒は冷却ステーション間でケーブルと閉回路を作って循環されこの閉回路内に冷凍機，熱交換器，圧送用ポンプが設置される。しかし，このモデルケーブルでは冷却の可能性を検討するために構造を簡単にし圧送用ポンプを用いず，液体窒素を2,600ℓの液体窒素貯槽（以下CE）の内圧を利用し熱交換器に送り，更にケーブル内に圧送しケーブルの片端より大気に放出する構造とした。熱交換器では常圧下で約77Kの液体窒素に浸された熱交換コイルに加圧液体窒素が流され過冷却にされる。液体窒素の流量と圧力はCEの内圧と第3.4図に示す冷却系統図のバルブを操作して調節した。

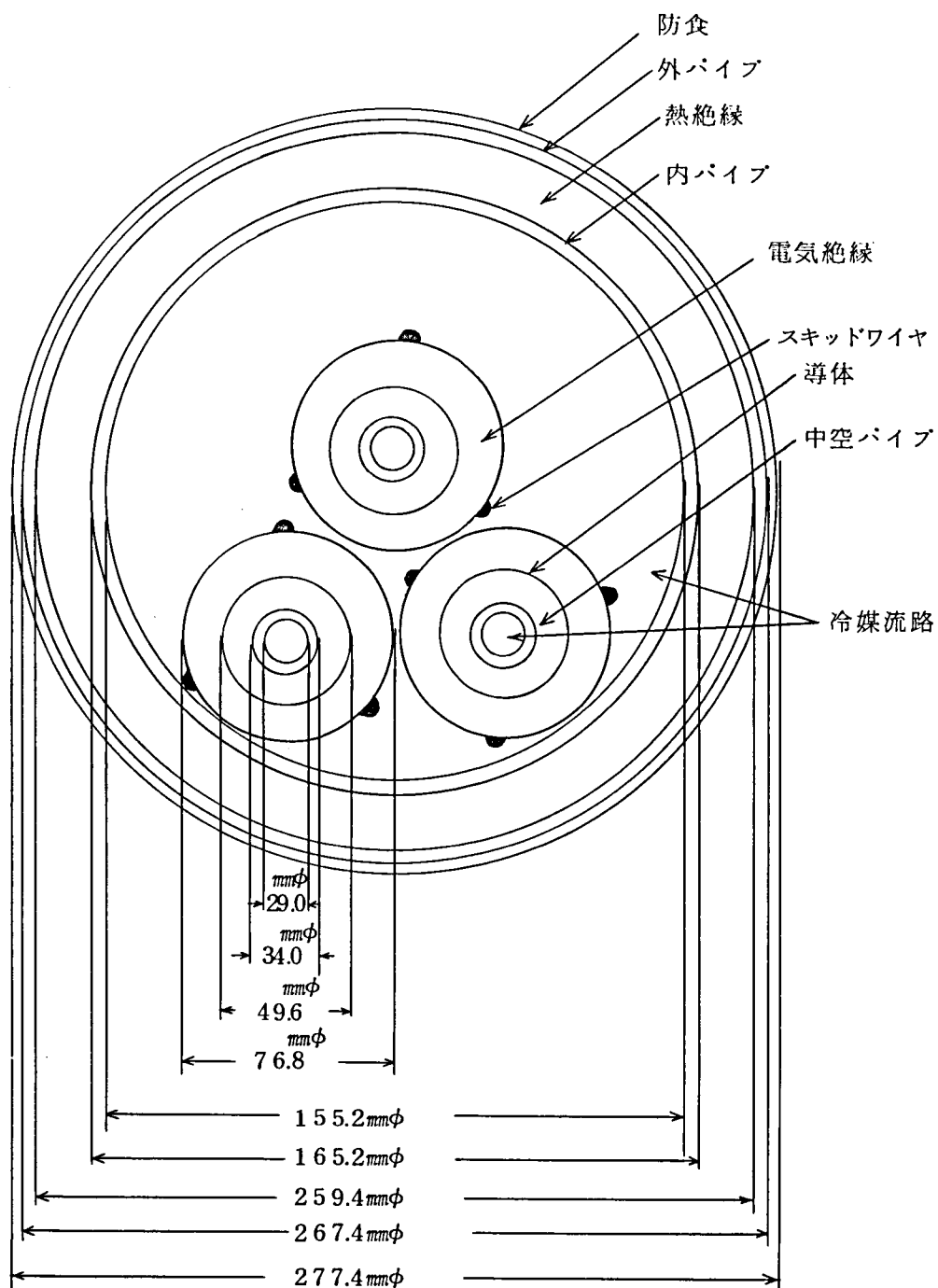
< 3.2.2 > モデルケーブルの特性

ケーブルの冷却試験は次の順序で行った。先づケーブルの真空多層熱絶縁を働かせるために断熱層を 10^{-2} Torr 以下に真空引する。次にケーブル内部を真空引してから窒素ガスで真空を破り第3.4図の冷却系のバルブ操作によりケーブルの冷却を行う。冷却段階では液体窒素の流量を出来るだけ絞ってその蒸発潜熱を利用し液体の消費量を押え，ケーブル片端よりガスを放出した。予冷は放出端より液体窒素が出て来る事で完了する。予冷に要した時間は5hで冷却終了時の液体窒素の流量は500ℓ/hであった。

電気試験結果を第3.3表に示す。なお予冷前と冷却終了時の $\tan \delta$ を測定したが夫々1.34%と0.20%であった。クラフト紙は乾紙でないで常温の $\tan \delta$ が大であるが冷却が進むに従って次第に小さくなり，冷却終了時には水分が凍結されて0.2%となっている。このクラフト紙はOFケーブル用の高密度紙であるので $\tan \delta$ はあまり小さくないがそれでも油浸の場合より約77%小さい値を示している。

第3.3表 154KV第1次モデルケーブル電気試験結果

項 目	交流耐電圧試験 50Hz
液体窒素圧力Kg/cm ² G	6 (93K)
加圧含浸時間 h	2
課 電 方 法	200KVより10KV/minにて昇圧
破 壊 値	350KVでFRP断熱パイプ外せん (第3.4図に点線で示す。)
$\tan \delta$ %	0.2



第 3.5 図 154 kV 第 2 次モデルケーブル断面

交流耐電圧試験における破壊値は350KVでFRP断熱パイプの外せんでありケーブル部は154KV級として十分な耐電圧値を持っている。しかしこのモデルケーブルの終端部は熱的にも電氣的にも不安定な構造であり、一方ケーブル部の熱絶縁方式も長尺のケーブルの場合にはその構造上真空引に問題が残っている。

§ 3.3 154KV第2次モデルケーブル²⁴⁾

第1次モデルケーブルの試験結果から更に熱的電氣的安定を目ざして154KV, 1,000MVA級の実規模に近い第2次モデルケーブルを開発し冷却実験と耐電圧実験を行った。

< 3.3.1 > ケーブルの構成

a) ケーブルの構造

第1次モデルケーブルではケーブルコア自身に熱絶縁を行った単心構造であるので、冷媒の帰路をケーブル内に設ける事が困難でありその上長尺に亘って熱絶縁層を高真空に保つ事もむづかしい。それ故第2次モデルケーブルではこれ等の欠点を改良するために、ケーブルの構造として第3.5図のような交流3相の従来のパイプタイプケーブルと類似のものを考える。即ち導体内に冷媒流路を持った、より線上にテープ積層絶縁を行った3本のケーブルコアを断熱圧力パイプ中に引き込み液体窒素で含浸し強制冷却する構造である。

第2次モデルケーブルではこの中1相分について実験を進めた。

b) 電気絶縁材料

電気絶縁材料として第1次モデルケーブルには高密度クラフト紙を用い十分な耐電圧性がある事を確認したが、一方 $\tan \delta$ は0.2%と大きい結果となった。

第2次モデルケーブルでは、第2章のように衝撃破壊電圧がクラフト紙より20%程度低いけれども、 $\tan \delta$ が 10^{-3} %のオーダーであるポリエチレン不織布紙（以下ポリエチレン紙）を採用する。なおカーボン紙は遮蔽効果が少くその上ケーブルの $\tan \delta$ を増加させる^{16, 25)}るので遮蔽層として金属化ポリエステル紙を用いる。²⁶⁾

c) ケーブルコアの構造

ケーブルコアは導体材料にアルミを採用し、下記の方法で表皮効果と熱収縮の対策を施したより線上にポリエチレン紙を12mm厚に積層絶縁したもので、第3.4表にケーブルコアの構造を示した。なおポリエチレン紙は第2.3表の特性のものを使用した。

1) 表皮効果対策

極低温ケーブルでは常温のケーブルに比較して導体の導電率が高くなるために表皮効

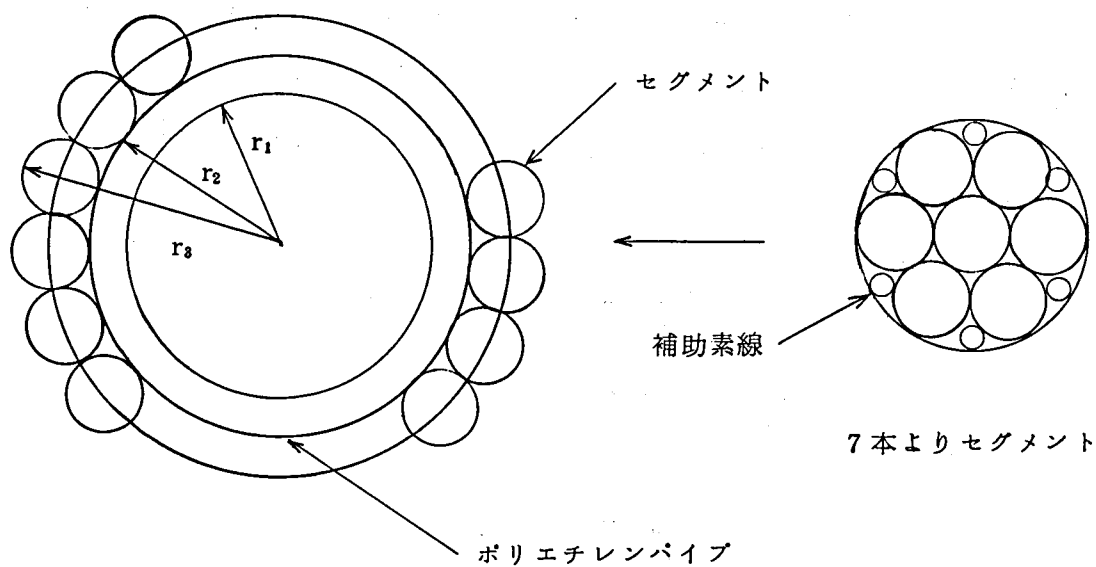
果が大でこの影響を避けるため絶縁された細い素線を転移して素線電流の均一化を計った²⁷⁾リッツより線が提案されている。しかし液体窒素温度では表皮厚さは約 3.5 mmと比較的厚くその上このケーブルは大電力輸送用であるので大きい冷媒流路を持った中空大導体が採用される結果、表皮効果に対して寸法的に有利になっている。従って導体として第 3.6 図のように 7 個の素線を丸よりしてセグメントを作りそれを更により合せたリッツより線を考える。なおこのより線の占積率はセグメントの本数が整数である事から次²⁸⁾式で与えられる。

$$Pf = \frac{7}{36} \left| \pi \left(\frac{r_3 + r_2}{r_3 - r_2} \right) \right| \frac{r_3 - r_2}{r_3 + r_2} \dots\dots\dots (3.1)$$

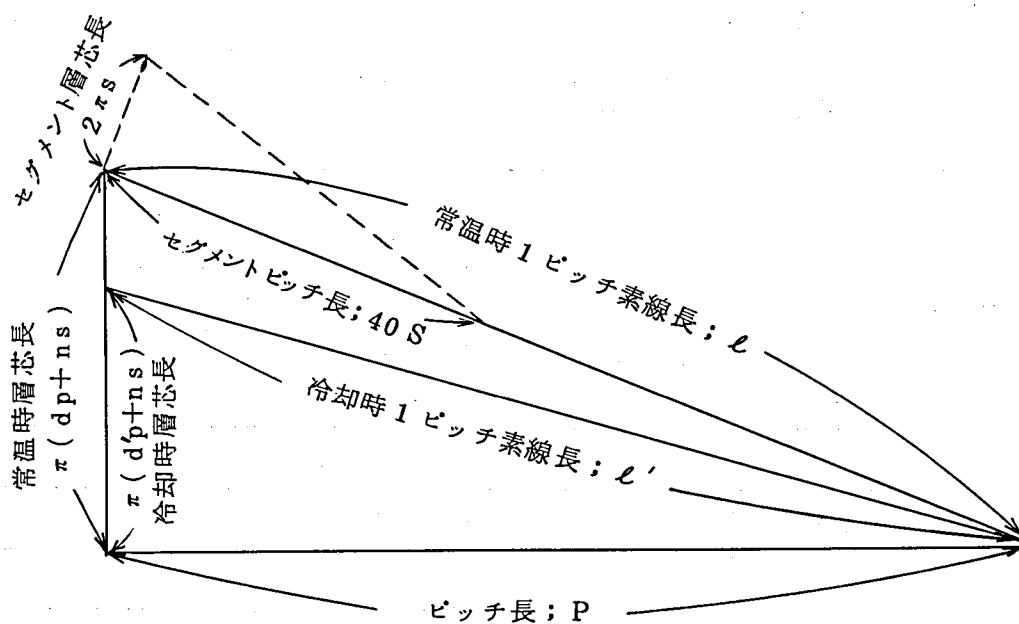
ただし $\left| \pi \left(\frac{r_3 + r_2}{r_3 - r_2} \right) \right|$ は整数とする。

第 3.4 表 154KV 第 2 次モデルケーブルコア構造表

項 目	材 料	寸 法 (mm)	摘 要
中空パイプ	ハイゼックス	I D 2 9.0 O D 3 4.0	冷媒流路
導 体	EC アルミ	2.6 φ × 7 × 16 本	中空リッツより
外 径		4 9.6	
遮 蔽	金属化 ポリエステルテープ	0.1 × 2 枚	組合せ巻
絶 縁	ポリエチレン紙	1 2.1	
遮 蔽	金属化ポリエステルテープ	0.1 × 2 枚	組合せ巻
外 径		7 4.6	
補 強	軟銅テープ	0.1 × 2 枚	} 組合せ巻
	金属化ポリエステルテープ	0.1 × 2 枚	
	ポリエステルテープ	0.1 2 5 × 4 枚	
	ステンレステープ ポリエステルテープ	0.1 × 1 枚 0.1 2 5 × 1 枚	
外 径		7 6.8	
スキッドワイヤ	D 型 ポリエチレン	3 × 2 条	
外 径		8 2.8	



第 3.6 図 非収縮型リッツより線



第 3.7 図 より線展開図

ここに Pf ; 占積率 (%) , r_2 ; リッツより内半径 (cm)

r_3 ; リッツより外半径 (cm)

2) 熱収縮対策²⁸⁾

このケーブルでは常温から極低温まで冷却されるためにケーブルコアの熱収縮が重要な問題となる。例えばアルミの場合には常温より液体窒素温度になると 0.4 % 程度の収縮が起る。ケーブルコアを収容するパイプの熱収縮は第 3.13 図に示すように適当な間隔で伸縮ジョイントを挿入するかベローズを設ける事で吸収出来るが、ケーブルコアの熱収縮対策は、i) 終端箱や接続箱で集中的に吸収する。ii) ケーブルコアにループや弛みを持たせる。等が考えられる。しかしこのような方法では実施に当り多くの問題を残している。それ故より簡単で安定な熱収縮対策として、極低温で十分な強度を持ち熱収縮率が導体材料より約 10 倍程度大きいプラスチックパイプ、例えば高密度ポリエチレンパイプ上に第 3.6 図のようにより線を行ない、より線導体の熱収縮を半径方向の変化だけで吸収し長さ方向に変化を生じないようにする方法が考えられる。なおこのパイプは小穴をあけるか或はスパイラル状にして導体の冷却に支障がないようにして置く。冷却後も導体長が変化しないためにはピッチと層芯径の関係は次式で表わされる。

$$\frac{P}{d_p + ns} = \pi \sqrt{\frac{\left(\frac{d'_p + ns}{d_p + ns}\right)^2 - \left(\frac{l'}{l}\right)^2}{\left(\frac{l'}{l}\right)^2 - 1}} \dots\dots\dots (3.2)$$

ここに P ; ピッチ長 (cm) , d_p ; 常温時パイプ径 (cm)

d'_p ; 冷却後パイプ径 (cm) , l ; 常温時 1 ピッチ素線長 (cm)

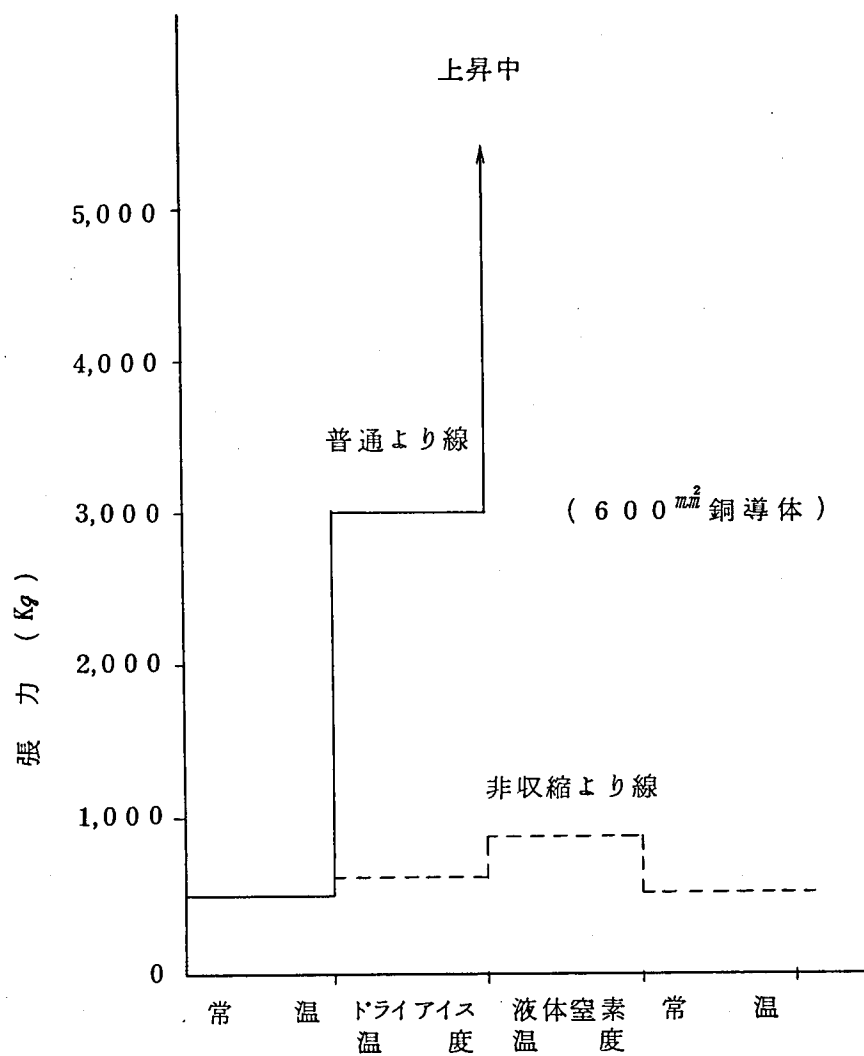
l' ; 冷却時 1 ピッチ素線長 (cm) , s ; 素線直径 (cm) , n ; 素線層数に応じて 1 , 3 , 5 となる。

(3.2) 式は第 3.7 図に示したように素線長 l が l' に収縮するのを層芯径 ($d_p + ns$) が ($d'_p + ns$) に減少する事で吸収しピッチ p が冷却の前後で不変である条件から求められる。なおこの場合に素線の半径方向の収縮は無視した。

(3.2) 式の n は上述のリッツよりの場合には 3 となる。第 3.7 図にリッツよりしたセグメント外層素線の 1 ピッチを展開し、集合よりしたセグメント中心素線の展開図の上に重ねて示した。これよりセグメントよりのピッチは層芯径 $2S$ に比較して十分大で $40S$ 以上であるので、中心素線の収縮が 0.4 % の場合に外層素線では 0.39 % になり殆んど 0.4 % に近く中心以外の素線の熱収縮も十分半径方向に吸収される事が判る。

第 3.5 表 非収縮体の構成

導 体 断 面 積	mm^2	6 0 0
素 線 径	mm	2.6 0
パイプ外径	mm	3 4.0
セグメント本数		1 6
セグメントよりピッチ	mm	1 0 4
リッツよりピッチ	mm	3 6 8
占 積 率	%	5 8.1
よ り 線 外 径	mm	4 9.6



第 3.8 図 導 体 冷 却 試 験 結 果

上述の原理で外径 3.4 mm 肉厚 2.5 mm の高密度ポリエチレンパイプ上に第 3.5 表の素線構成でより線を行って断面積 6.00 mm² の非収縮銅導体を試作し冷却実験を行った。常温で試料長 1.5 m の導体を断熱トラフに入れ張力計を介して両端を固定し導体の緩みを吸収するために 500 Kg の初期張力を加える。次に断熱トラフにドライアイスを満たし約 195 K まで導体を冷却する。温度が一定になって張力計の読みが安定してから更に液体窒素で約 77 K まで冷却する。

熱収縮による張力の変化を普通より線の場合と共に第 3.8 図に示した。普通より線ではドライアイス温度で 3,000 Kg の張力を示し、液体窒素で冷却中も張力は上昇し続けるが、非収縮より線では液体窒素温度でも異常な張力が発生せず常温と極低温とのヒートサイクルにも安定した張力を示している。一方絶縁層の熱収縮はポリエチレン紙以外は大きくなく冷却の際に導体の半径方向の収縮に対してテープの緩みを生じる。しかし積層テープ巻絶縁であるので緩みが積層間に分散されて部分的に緩みや導体との間にギャップを生じない。又テープの巾方向の収縮はテープ間のギャップで吸収されて導体自身が長さ変化を起さない事と併せてギャップが 1 ケ所に集中する事はなく電気絶縁に対して弱点にならない。

d) 低温圧力容器

極低温ケーブルの低温圧力容器は極低温の冷媒を高圧で封入するためにこの温度で低温脆性を示さない丈夫な材料が必要になる。一方電気的には、ケーブルコアからの不平衡磁束によるパイプ損失を低減させるために高導電率の材料が望ましい。これ等の要求を満足させるために高導電率のアルミを内張りし機械的強度をステンレス鋼に持たせたパイプが^{29), 30)}提案されている。しかしこのモデルケーブルでは冷却と耐電圧試験が目的であるので普通のステンレス鋼パイプを採用した。一方冷却時の熱収縮対策には熱収縮吸収用のステンレス鋼製のベローズを第 3.9 図のように用いる構造とした。各部の寸法と構成を第 3.10 図に又外観を第 3.11 図に示す。モデルケーブルの全長は 21.7 m で、ケーブル部の有効長は 19 m である。使用内圧は 15 Kg/cm²G であるが熱絶縁用の真空ジャケットが低温圧力容器を包む構造であるので 16 Kg/cm²G の内圧が加わるものとして設計し耐内圧試験を行い異常を認めなかった。ケーブルコアと碍子を除いた低温圧力容器の総重量は約 4.8 ton である。

e) 熱絶縁

上述の低温圧力容器の熱絶縁として真空多層断熱を施工と性能の検討のために採用し、

熱伝導率 $3 \mu\text{W}/\text{cmK}$ 以下を目標にして第2章の実験結果より 0.1 mm 厚のアルミ貼り合せポリエステルテープとグラステープを40層積層し内部を 10^{-2} Torr に真空引する構造とした。第3.12図に熱絶縁層の施工状況を示す。

f) スペースの構造

このケーブルでは極低温部を常温部から支えねばならないのでスペースが必要になり、そこからの熱侵入は避けられない。それ故スペースとしては熱伝導率が小さく十分な機械的強度を持ち侵入熱の小さい構造が好ましい。材質としては機械的強度と熱伝導率の比が大きいダクロン、ナイロン、マイラ等が好ましい。しかしこれ等を用いたスペースの構造は複雑で断熱パイプの接続工事も容易で無い。それ故より簡単な構造としてスペースにステンレス鋼を用い第3.13図の支持方法で断熱加工されたパイプを工事現場で熔接し、接続部が熱絶縁のスペースを兼ねる構造を採用した。この場合スペースからの侵入熱はパイプ単位長に換算して次式のようなになる。

$$q_{\text{THS}} = \frac{4\pi k_s t_s (r_H - r_L)(T_H - T_L)}{L_s \cdot L_p \ln \frac{r_H}{r_L}} \dots\dots\dots (3.3)$$

ここに q_{THS} ; スペースからの侵入熱 (W/cm)

k_s ; " の熱伝導率 (W/cmK)

t_s ; " の肉厚 (cm) , L_s ; スペースの長さ (cm)

L_p ; パイプ長 (cm) , r ; パイプ半径 (cm)

T ; パイプ温度 (K)

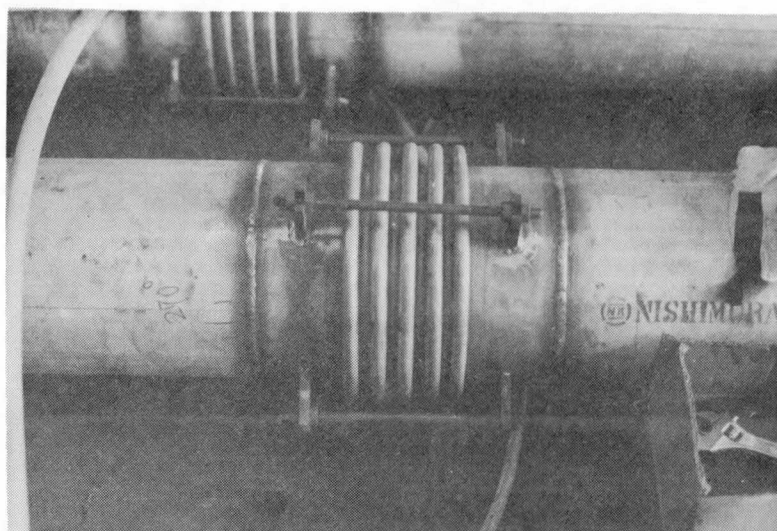
添字 H, L は夫々高温側, 低温側を意味する。

(2.11), (3.3) 式で求めたこのモデルケーブルの低温圧力パイプの侵入熱は夫々

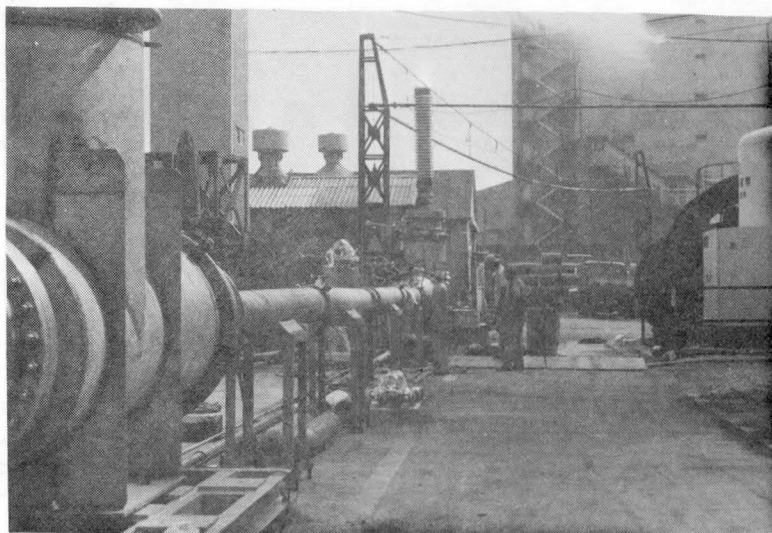
$q_{\text{SI}} = 0.01 \text{ W}/\text{cm}$, 及び $q_{\text{THS}} = 0.30 \text{ W}/\text{cm}$ となる。

g) 終 端 箱³¹⁾

このケーブルの終端箱は極低温から常温まで大電流を導き出し、しかも高電圧に耐えねばならない。第1次モデルケーブルの終端部ではケーブルの末端のコンデンサーコーンは過冷却の液体窒素で加圧含浸されているので十分熱的電氣的に安定である。しかしコンデンサーコーンを収容するFRP絶縁筒は常圧の液体窒素中に浸されこの液体窒素は常温と接する碍子中に入れられているので、熱的電氣的に非常に不安定になっている。冷媒が液相を維持出来る極低温では、既述(第2章)のように冷媒含浸のテープ積層絶縁が良好な



第 3.9 図 熱収縮吸収用ベローズ
(外パイプ用)



第 3.1 1 図 第 2 次モデルケーブル外観

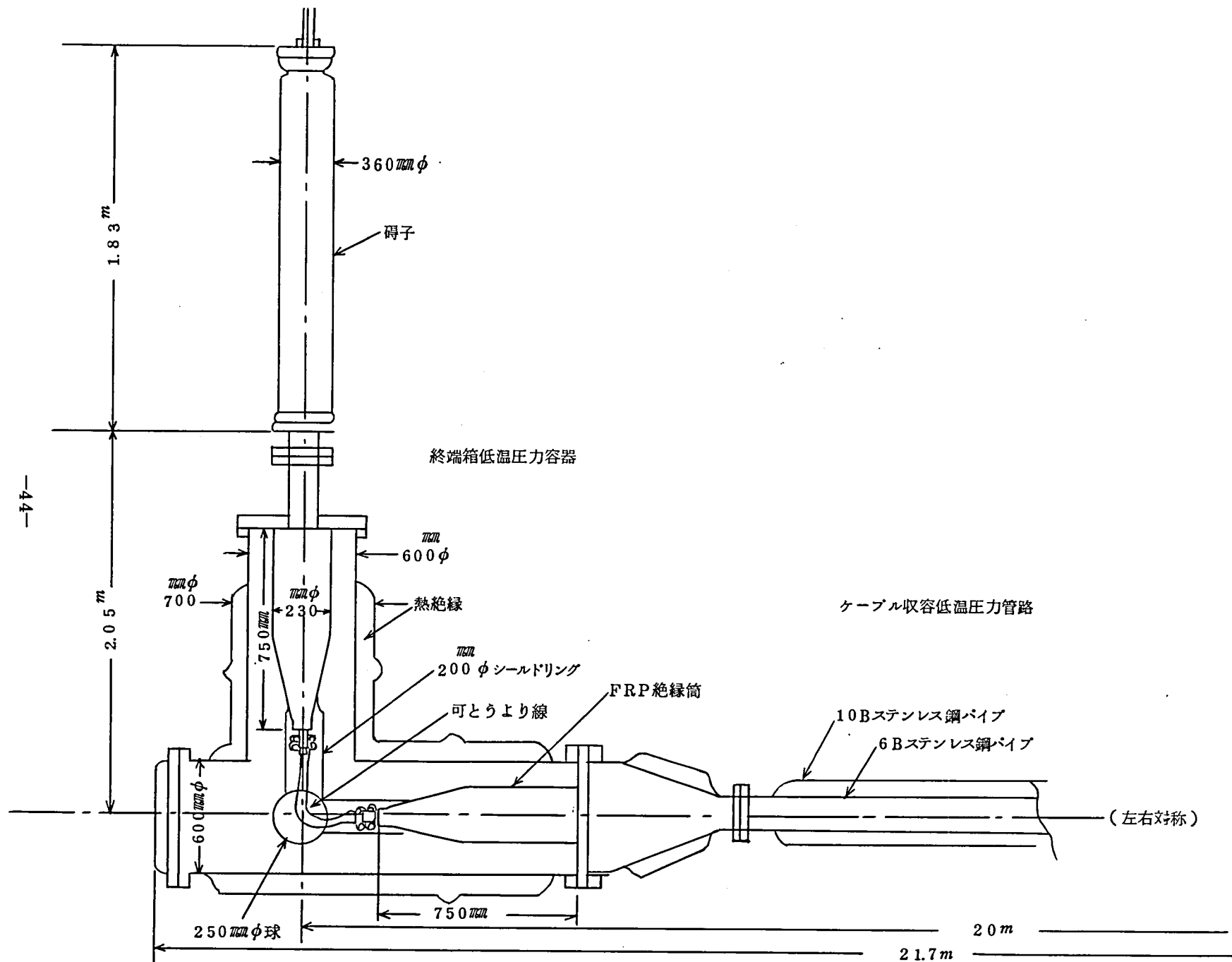
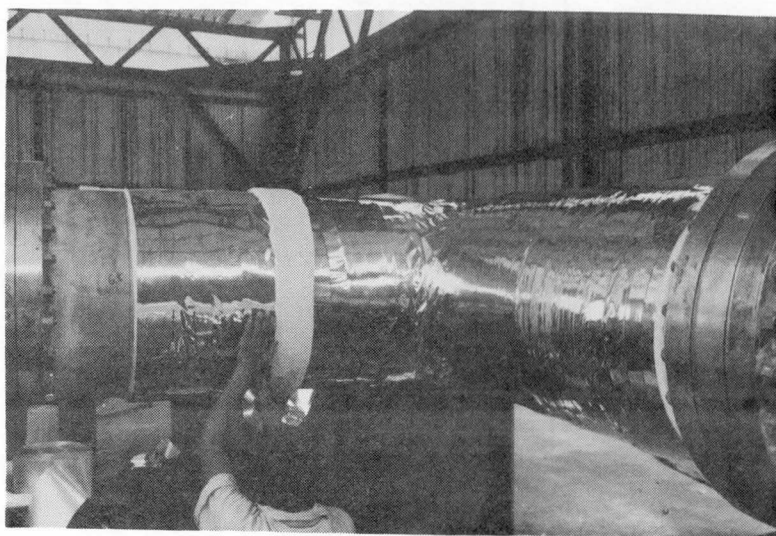
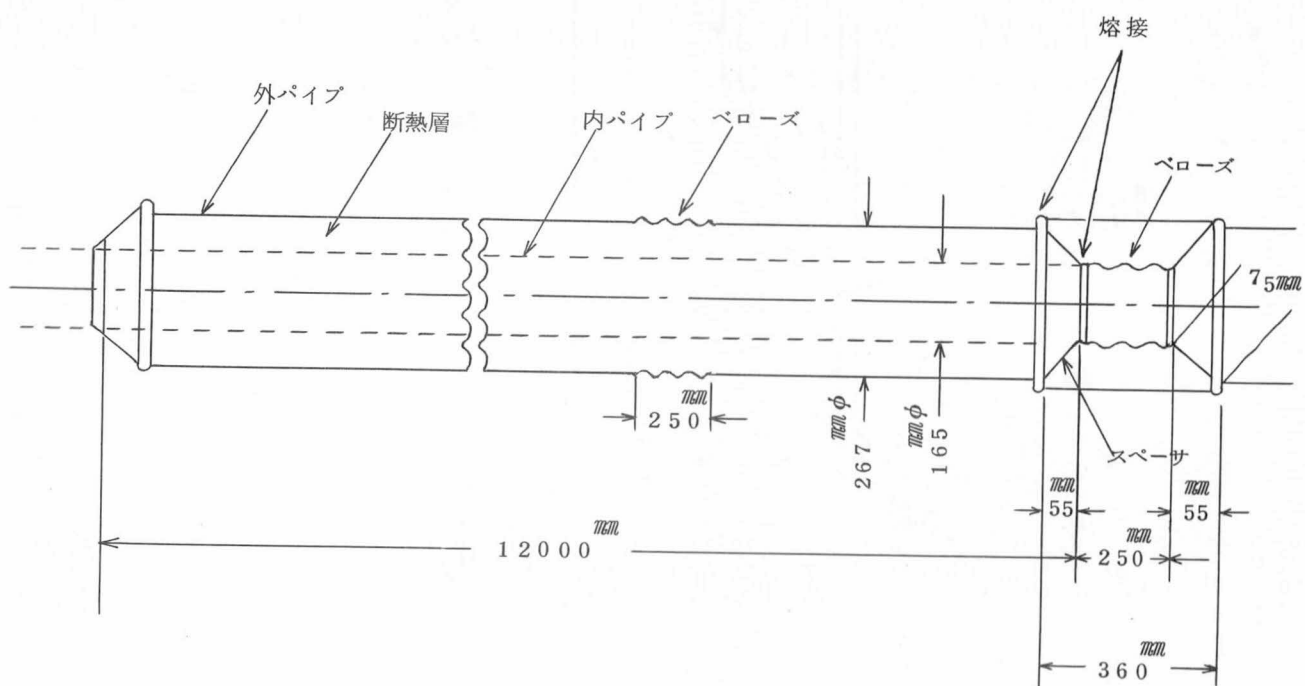


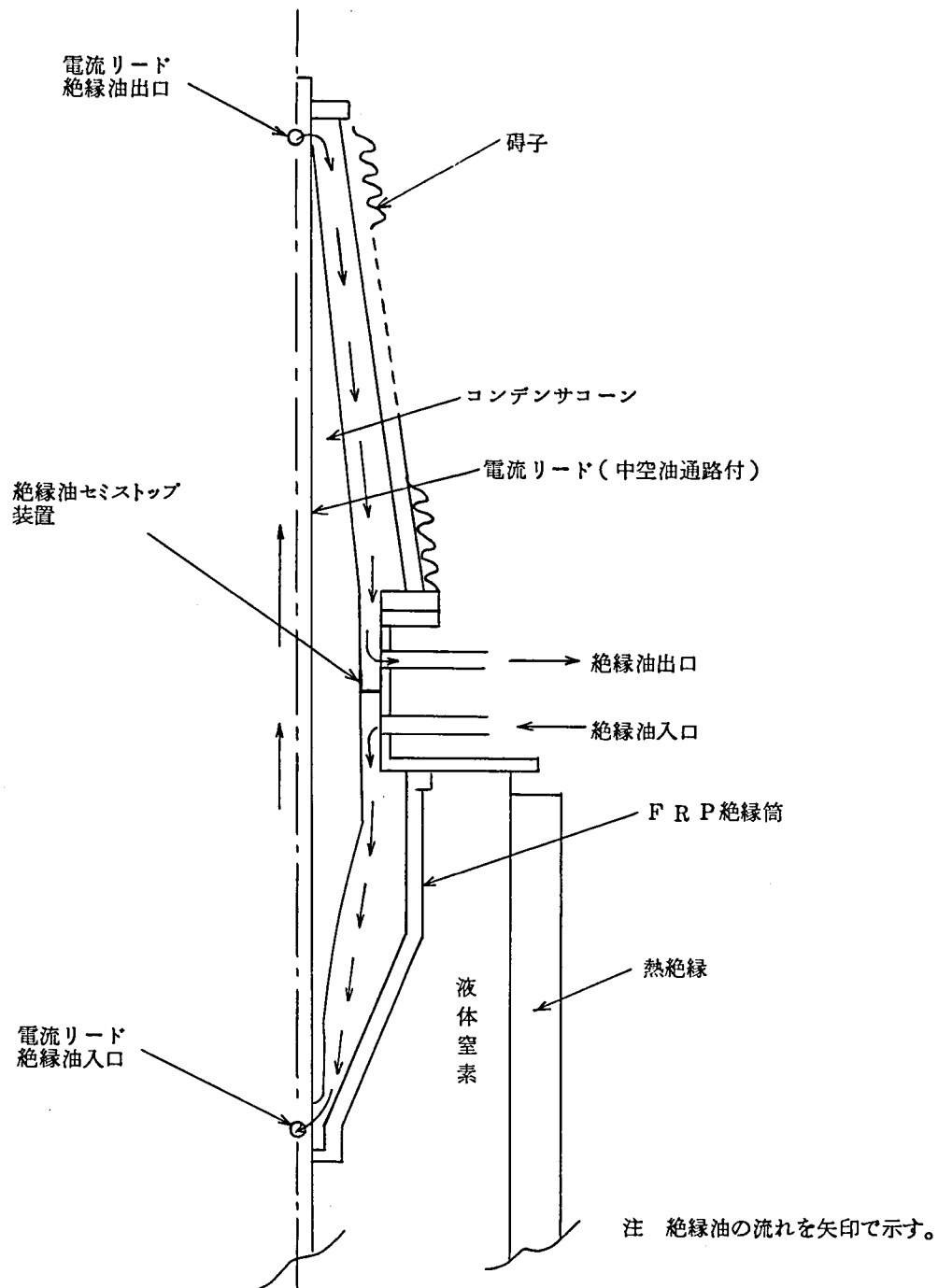
図 3.10 図 154 KV 第 2 次モデルケーブルの構成



第 3.1 2 図 真空多層熱絶縁の施工



第 3.1 3 図 断熱パイプの接続



第 3.1 4 図 1 5 4 KV 第 2 次モデルケーブル終端箱

特性を示し、常温域では従来の超高圧ケーブルでとられている絶縁方法が可能である。しかし中間の温度範囲で安定に使用出来る絶縁性能の良い材料が見当らず、いかにこの温度範囲を絶縁処理するかが問題となる。この具体的方法として第 3.1 4 図に示すように中間温度領域にブッシングを用い絶縁油をブッシング内に強制循環して凍結を防止する方法を考案した。この方法で第 2 次モデル用に開発された 1 5 4 KV 級終端箱は交流電圧で 4 1 0 KV³²⁾以上衝撃電圧で 1,1 0 0 KV 以上の高い耐電圧値を持っている。このモデルケーブルの終端部はこの終端箱とケーブルコア終端に設けたコンデンサーコーンの端末を可撓より線で連結しシールドカバを取り付け液体窒素で絶縁した第 3.1 0 図の構造である。

h) 冷却ユニット

第 2 次モデルケーブル用に開発した液体窒素の冷却ユニットの系統図を第 3.1 5 図に示す。1 0,0 0 0 ℓ C E より取り出された液体窒素は遠心型ポンプで加圧され大気圧の液体窒素を貯めた熱交換器で約 7 7 K に過冷却されて第 3.1 6 図のように両終端箱とケーブル部の 3 系統に分流されモデルケーブルを冷却し C E に帰される。熱交換器内の大気圧の液体窒素の液面は差圧を利用したダイヤフラムバルブにより常時設定レベル内に維持され又モデルケーブル内の液体窒素の圧力は圧力コントロール用バルブにより自動制御される。これ等バルブ類は同一ボックス内に置かれ一ヶ所で冷却系の運転監視が出来るようになっている。第 3.1 7 図に冷却ユニットの外観を、その仕様を第 3.6 表に示す。実際のケーブルではこのような熱交換器の代わりに冷凍機が用いられる。

< 3.3.2 > モデルケーブルの特性

a) ケーブルコアの曲げ特性

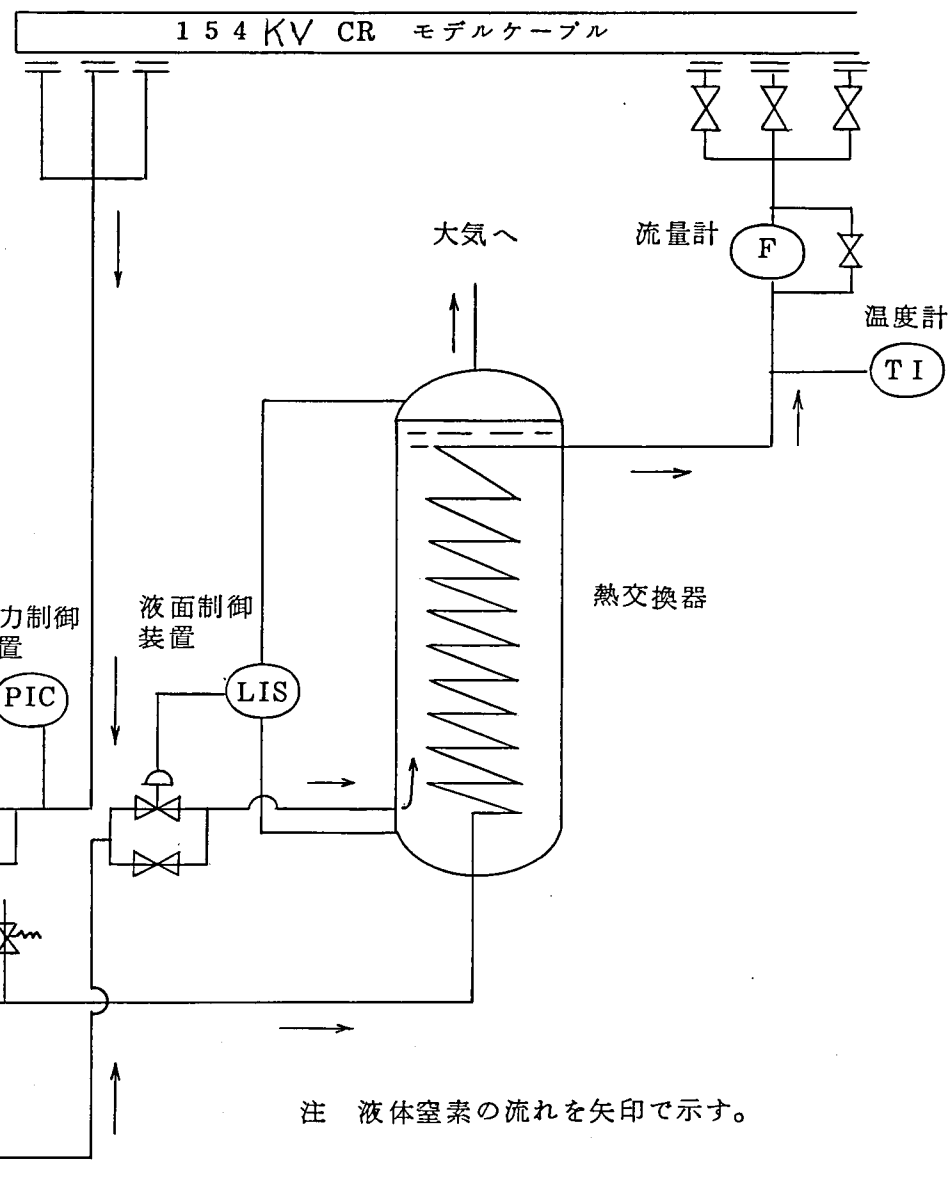
ケーブルコアは製造中のドラム巻きや布設時に曲げを受けるため絶縁層は十分これ等の曲げに耐えねばならない。モデルケーブルの絶縁層はポリエチレン紙であるが従来のケーブルと同じ外径の 2 0 倍の曲げ径で 2 往復の曲げ試験を行った。解体の結果皺、紙切れ等の異常が全く認められず従来の O F ケーブルと同程度の曲げ特性が得られた。

b) モデルケーブルの冷却

第 3.1 0 図の低温圧力容器に上述の非収縮性ケーブルコアを引き込み両端にコンデンサーコーンを組立てる。断熱パイプの両端を固定し冷却後も低温圧力容器が長さ変化を生じないようにし更に F R P 絶縁筒を介してケーブルコアを固定してコア自身も長さ変化を起さないように拘束した。

実際のケーブルの冷却ではどのような手順で予冷し定常運転状態にするかは重要な問題

F ; 流量計 (タービン, フローメータ)
 TI ; 温度計
 PIC ; 圧力制御装置
 LIS ; 液面制御装置



第 3.15 液体窒素冷却ユニット系統図

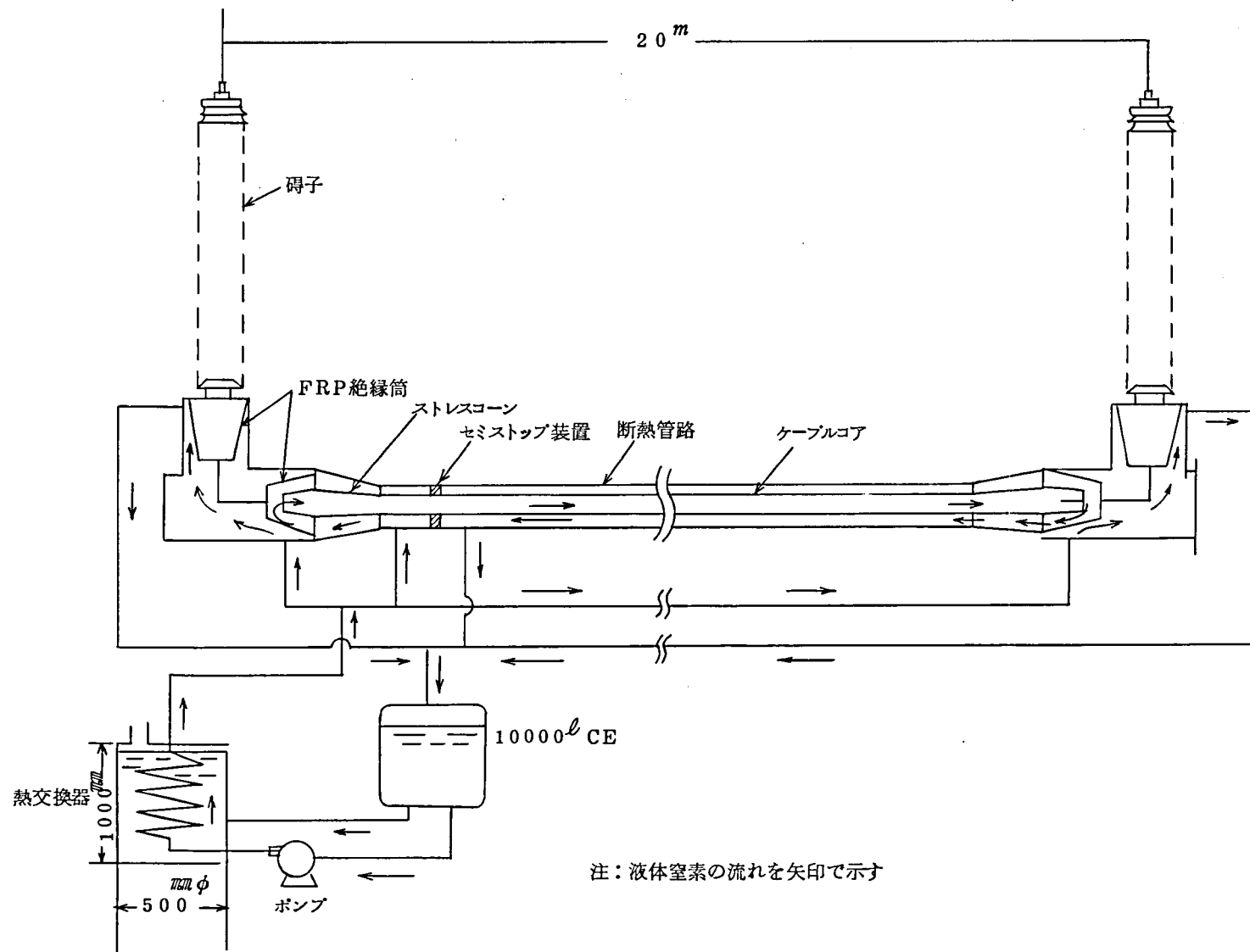
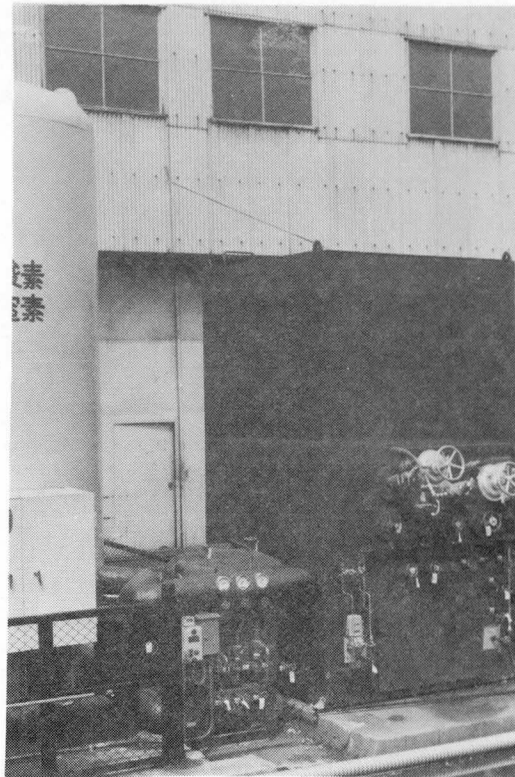


図 3.16 図 154 KV 第2次モデルケーブル冷媒循環径路

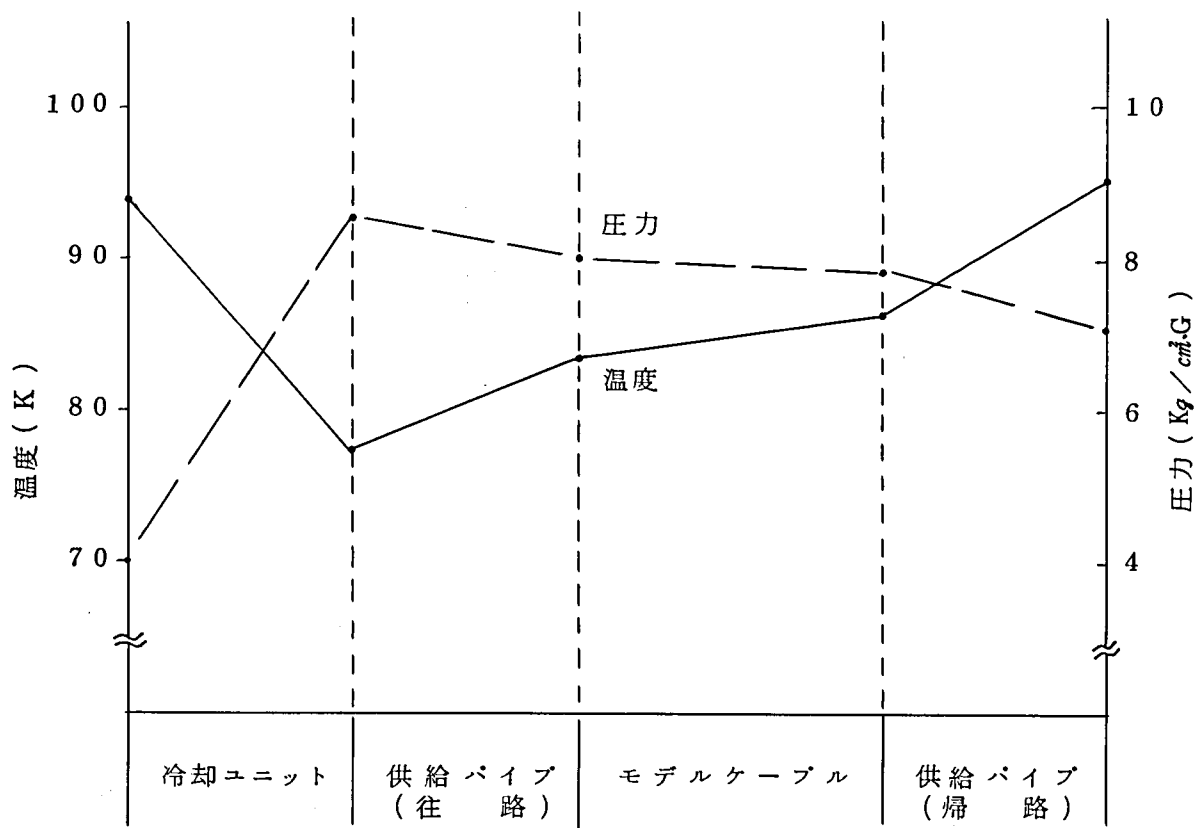


第 3.17 図 液体窒素冷却ユニット外観

第 3.6 表 液体窒素冷却ユニット仕様

液体窒素加圧ポンプ	15 Kg/cm^2 にて流量 3,500 ℓ/h
熱 交 換 器	流量 3,500 ℓ/h にて熱交換器 出口側の液体窒素温度 80 K 以下
流 量 計	タービンフローメータ

である。予冷時間は通常の低温機器が $5 \sim 10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ で予冷されているのでこの値をモデルケーブルの予冷に採用した。予冷は第 1 次モデルケーブルと同じ方法で行ったが第 3.15 図の冷却系を使用した。即ち C E の自圧を利用し熱交換器により過冷却状態とした液体窒素を約 45 m の断熱配管を通し乍らモデルケーブルに圧入する。このため当初コールドガスの比熱で冷却されていた試料は、徐々に液体窒素の蒸発潜熱で冷却される。蒸発したガスは両終端箱および水平パイプ部に取付けられたブロー用の 2 吋長軸バルブにより直接大



第 3.1 8 図 液体窒素冷却循環系の温度圧力分布

気中に放出される。このようにしてブロー弁から液体窒素が噴出した状態で予冷を完了する。この間モデルケーブル内の液体窒素の液面はパイプ内に分散配置された熱電対の指示温度により監視する。予冷終了後ポンプを作動させて定常運転状態とする。予冷に要した時間は約20 hである。ポンプ運転後定常状態における各部の温度、圧力分布を第3.18図に示す。4 Kg/cm²GのCE圧力での飽和湿度になっている液体窒素はポンプで8.5 Kg/cm²Gまで加圧される。こうして加圧された液体窒素は依然として飽和状態であるが常圧の液体窒素を溜めた熱交換器中を通すことで、約77 Kまで温度が下げられ過冷却状態となる。過冷却の液体窒素は供給用断熱パイプを通過し乍ら約6 Kの温度上昇を起し第3.16図に示すように3系統に分流されてモデルケーブルに供給される。この冷却実験では通電は行わないため、ケーブル部の温度上昇は僅かである。ポンプ運転時の液体窒素の流量は吐出圧が低いため約5,000 l/hであって設計流量3,500 l/hの43%増となったが安定に運転出来た。

c) 電気試験結果³³⁾

20時間かけて予冷したモデルケーブルを液体窒素循環ポンプで2時間加圧含浸してから課電した。試験結果を第3.7表に示したが、交流破壊電圧は154 KV級として十分な特性を示した。一方衝撃破壊値はBIL750 KVを約13%越えてはいるが、油浸紙を用いたOFケーブルよりも約10%低く第2章の課電試料と同様な傾向を示した。このケーブルコアは熱収縮の対策を施した非収縮型であるので、常温で両端を固定して長さ方向の熱収縮を拘束したにも拘らず冷却に際して熱応力が発生せず課電後の解体調査でも皺、紙切

第3.7表 電気試験結果

項 目	交流電圧 50Hz	衝撃電圧 (1×40) μS
液体窒素圧力 Kg/cm ² G	8	8
加圧含浸時間 h	2	5
課 電 方 法	150 KVより10 KV/minにて昇圧200 KV, 300 KVにて10 min保持	700 KVより50 KV/3回にて昇圧
破 壊 電 圧 KV	380	850
破 壊 ケ 所	ケーブル	ケーブル
破壊電位傾度 KV/mm	39	87
tan δ %	1×10 ⁻³ (at 150KV), 4×10 ⁻³ (at 10kHz)	
ε	1.8	

れ、ソフトスポット及び導体素線の伸び等の異常が全く認められなかった。一方 $\tan \delta$ は通常のシェーリングブリッジの測定限界に近い値のためキャパシタンスブリッジを用い 10 kHz で測定したが、従来の絶縁紙に比して非常に小さい値を示した。

§ 3.4 要 約

本章では第 2 章の基礎実験検討結果より 154 KV 第 1 次、第 2 次モデルケーブルの開発を行い冷却と耐電圧試験を実施して以下の結論を得た。

- (1) 154 KV 級実規模ケーブルで、液体窒素含浸高密度クラフト紙の交流破壊電位傾度は OF ケーブルと同等の値を示した。
- (2) 第 2 次モデルケーブルの加圧含浸冷却用に開発した冷却ユニットは長時間安定に自動運転出来た。
- (3) 熱的電氣的に安定した 154 KV 級終端箱の開発に成功した。
- (4) 表皮効果と熱収縮の対策を施したケーブルコアを開発し、第 2 次モデルケーブルを製作した。ポリエチレン紙絶縁のケーブルコアは、交流破壊では 154 KV 級として十分な値であるが、衝撃破壊が OF ケーブルよりも約 10 % 低い値となった。
- (5) 低温圧力容器の熱的問題について、パッキングの材質と構造、熱収縮対策ベローズの取り付け方法、熱絶縁、パイプの接続方法等を具体的に検討し各々について問題を解決した。

以上、モデルケーブルの運転試験結果から冷却系、電気絶縁系、熱絶縁系の諸問題に関し多くの知見が得られ 500 KV 級極低温ケーブルの実現の見通しが得られた。

第 4 章 500 kV 極低温ケーブルの設計と送電容量の検討

§ 4.1 梗概

本章では送電々圧 500 KV, 送電容量 3,000 ~ 5,000 MVA 級の極低温ケーブルの設計について論じ次いで, 冷却方式と冷凍機間隔の関係及び各冷却方式の経済性について検討している。ケーブルの構造はケーブルコアの外径を製造と輸送上の制約から 150 mm ϕ に押え, 表皮効果対策と熱収縮対策を施した導体にテープ巻き絶縁を行う。このケーブルコア 3 本を断熱管路に引き入れ, 液体窒素で加圧含浸した 154 KV 第 2 次モデルケーブルと同様な構造を考える。

テープ絶縁体としてポリエチレン紙, PP ラミネート紙, クラフト紙を, 又絶縁方式では真空多層熱絶縁とウレタンフォーム熱絶縁をとりあげる。次に導体断面積と導体内冷媒流路をパラメータにとって送電容量と冷凍機間隔に与えるこれ等の影響を調査する。その際にケーブル内の冷媒の圧力降下を最小にし冷凍機間隔を最大にする場合と, 冷凍機間隔は短くなるがケーブルの熱負荷を最小にする場合について, 冷凍機の資本費と 10 年間運転費を求めて各々の経済性を比較する。なお上述の検討のためにはケーブル内の温度分布を知る必要から熱等価回路を設定して温度分布の計算式を求めている。

終りにこのケーブルの経済性を強制冷却された従来型大容量送電ケーブルと比較している。

§ 4.2 500 KV 極低温ケーブルの設計

< 4.2.1 > ケーブルの構造

ケーブルの構造は第 3 章第 3.5 図に示す 154 KV 第 2 次モデルケーブルと類似の物を考える。導体構造も同じく第 3.6 図のようにポリエチレンパイプ上に 7 本とりセグメントを 1 層リッツよりして表皮効果と熱収縮対策を施したものである。なお導体にはアルミを使用し素線径, 導体断面積及び冷媒流路はこのケーブルを冷却するのに必要な冷凍機の資本費と運転費が最小になるように決定する。

< 4.2.2 > 電気絶縁設計

電気絶縁材料としてポリエチレン紙, PP ラミネート紙 (以下 PP 紙) と 154 KV 第 1 次モデルケーブルの試験結果から高密度脱イオン水洗紙の誘電特性の改善を計るために低密度脱イオン水洗紙 (以下クラフト紙) をとりあげる。

500 KV 級ケーブルの設計に必要な液体窒素含浸状態のこれ等のテープの電気特性と熱抵抗^{35~41)}³⁰⁾及び常温の物理特性を第 4.1 表に示した。電気特性は課電試料の試験結果と 60 KV 及び⁴²⁾^{35~37)}³⁸⁾

第 4.1 表 絶縁テープの特性

項 目	クラフト紙	P P 紙	ポリエチレン紙
交流破壊電位傾度 KV/mm	3 6	3 4	3 2
衝撃破壊電位傾度 KV/mm	9 0	8 5	8 0
ϵ	2.5	2.1	1.7
$\tan \delta$ %	0.1 2	0.0 3	0.0 0 1
固有熱抵抗 cmK/W	5 5 0	5 0 0	2 0 0
平 均 厚 μm	1 2 5	1 2 8	1 1 0
密 度 g/cm^3	0.7 2	0.8 5	0.7 1
引張強さ Kg/15 cm	縦方向	1 1.8	4.9
	横方向	5.8	7.9
伸 び %	縦方向	2.3	3.3
	横方向	6.1	1 1.4
気密度 ガーレsec/100Cm ³	1,8 0 0		6,1 0 0

第 4.2 表 導体半径、絶縁厚と設計

項 目	クラフト紙	P P 紙	ポリエチレン紙
導 体 半 径 mm	4 3	4 1	3 8
絶 縁 厚 mm	2 7	2 9	3 2
交流電位傾度 KV/mm	1 3.7	1 3.1	1 2.4
BIL×12電位傾度KV/mm	8 8.5	8 4.7	8 0.0

154 KVモデルケーブルの¹⁶⁾実験結果から、交流破壊電位傾度は従来のOFケーブルと同程度であり、衝撃破壊電位傾度が幾らか低い傾向にある事を考慮して、衝撃破壊電位傾度を定め交流破壊電位傾度は衝撃電圧比を2.5として算出した。

絶縁設計に当って500 KVケーブルのBILを1,550 KVとしこれ等の絶縁紙についてBIL×1.2の衝撃電圧に耐えるように絶縁厚を決定する。ケーブルコアの最大外径を製造と輸送上の制約からスキッドワイヤ上で150 mmφとし、遮蔽層を銅側で0.2 mmづつ、コア補強層をスキッドワイヤ下に1.6 mmの厚さにとる。第4.1表を用いて夫々の絶縁紙について

絶縁厚と導体外径及び上記衝撃電圧と交流使用電圧下の電位傾度を求め第 4.2 表に示した。BIL×1.2 の衝撃電圧に耐えるように絶縁設計を行なっても交流使用電圧下の電位傾度は破壊電圧に比し 2.6 倍程度の裕度がある。

第 4.3 表 熱絶縁の特性

熱絶縁方式	フォーム断熱	真空多層断熱
熱絶縁厚 mm	113	35
断熱層外径 mm	616	460
熱伝導率 $k, \mu W/cmK$	150	3
侵入熱 $W_{TH} \quad W/cm$	0.473	0.026
スペーサ侵入熱 $W_{THS} \quad W/cm$	0.036	0.031

< 4.2.3 > 熱絶縁設計

熱絶縁には性能の高い真空多層断熱と性能がこれより劣るけれども構造が簡単で施工費が安いポリウレタンフォーム（以下フォーム断熱）について検討する。なお低温圧力パイプの接続とスペーサの構造は 154KV 第 2 次モデルケーブルで実績のある第 3.13 図のものを採用する。これ等の絶縁層の厚さは外気温が 30℃で相対湿度 85% の場合に熱絶縁層の外被が結露しない条件とし（2.12）式から求め第 4.3 表に示した。一方各断熱方式の侵入熱； W_{TH} (W/cm) 及びパイプ長を 12m とした場合に単位長に換算したスペーサ侵入熱； W_{THS} (W/cm) を求め第 4.3 表に示した。 W_{THS} はフォーム断熱では W_{TH} に比して 1/10 以下であるが真空多層断熱の場合には W_{TH} よりも大で総合した侵入熱はスペーサの無い場合の約 2.2 倍になる。しかし 500KV で 3,000～5,000 MVA 送電の場合の導体損は 0.2～0.7 $W/cm \cdot \phi$ 程度であるので第 4.3 表の W_{THS} は導体損に対して十分小さくこのようなスペーサ方式を採用しても総損失に占める割合は僅かである。

< 4.2.4 > ケーブルの熱損失

ケーブルを冷却するに必要な冷凍機の容量と、冷凍機間隔を知るためには先づケーブルの熱損失を求めねばならない。

ケーブルの熱損失には第 2 章で述べた導体損； W_C と外部からケーブルへの侵入熱； W_{TH} 、 W_{THS} の他に次の熱損失が生じる。

a) 誘電体損; W_d (W/cm)

$$W_d = 2 \pi f c \left(\frac{V_0}{\sqrt{3}} \right)^2 \tan \delta \times 10^{-9} \dots\dots\dots (4.1)$$

ここに c ; 静電容量 ($\mu F/Km$)

$$c = \frac{\epsilon}{18 \ln(r_4/r_3)} \quad (\mu F/Km)$$

f ; 周波数 (Hz) , ϵ ; 誘電率 , V_0 ; 線間電圧 (KV)

b) パイプ損; W_p (W/cm)

ケーブルコアを収容するステンレス鋼パイプにはパイプ損として渦電流による発熱が生じる。これを出来るだけ小さく押えるために高導電率のアルミ材を表皮厚さの数倍の厚さに裏打したパイプを考える。ケーブルコアが正三角形配置の場合のパイプ損⁴³⁾ W_p は

$$W_p = 1.4 \left\{ \frac{I \cdot a}{1 - \left(\frac{a}{r_0} \right)^2} \right\}^2 \frac{\rho_p}{\delta_p r_0^3} \dots\dots\dots (4.2)$$

ここに I ; 相電流 (A) , ρ_p ; パイプの固有抵抗 ($\Omega \cdot cm$)

r_0 ; パイプ内半径 (cm) , δ_p ; パイプの表皮深さ (cm)

a ; コアの正三角形配置の中心から導体中心までの距離 (cm)

$a = r_4 / \cos 30^\circ$ (cm) , r_4 ; コア半径 (cm)

c) シース回路損; W_s (W/cm)

$$W_s = \frac{2 X_m^2 R_s}{R_s^2 + X_m^2} I^2 \dots\dots\dots (4.3)$$

ここに X_m ; 補強層リアクタンス (Ω/cm)

$$X_m = 4 \pi f \ln \frac{S_c}{r_{sm}} \times 10^{-9} \quad (\Omega/cm)$$

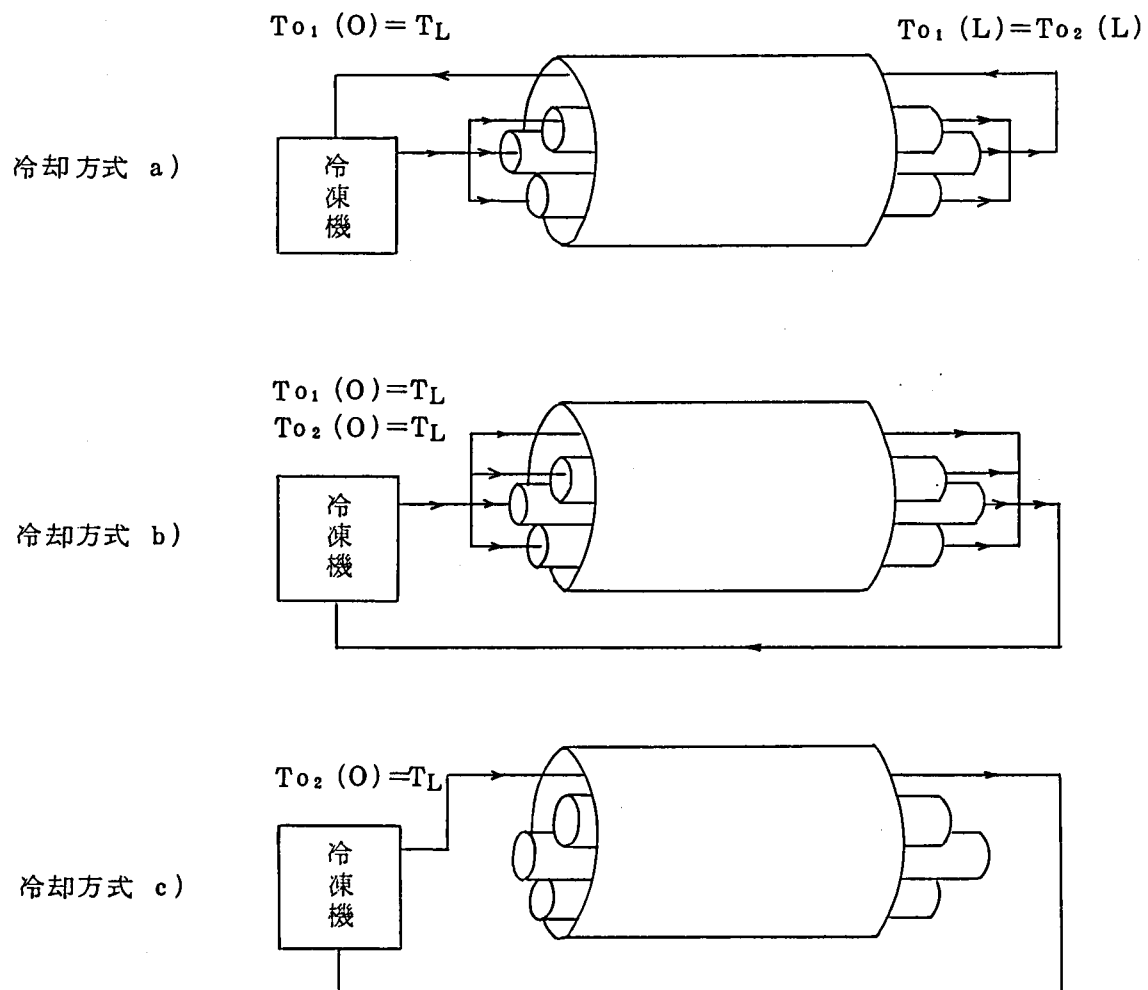
S_c ; コア間距離 = 15.0 cm , r_{sm} ; シース平均半径 = 7.13 cm

R_s ; 補強層抵抗

$$R_s = \frac{\rho_s}{A_s} \sqrt{1 + \left(\frac{2 \pi \cdot r_{sm}}{l_s} \right)^2} \times 10^{-6} \quad (\Omega/cm)$$

ここに ρ_s ; 補強層固有抵抗 = $0.6 \mu \Omega cm$

A_s ; 補強層断面積 = $2 \times 0.01 \times 2.0 \text{ cm}^2$



第 4.1 図 ケーブル冷却方式
(冷媒流路より見た)

注 T_{o1} ; 導体冷媒流路内の冷媒温度
 T_{o2} ; コア外側冷媒流路の冷媒温度
 T_L ; 冷凍機出口の冷媒温度

1 s ; 補強層の巻きピッチ = 2.0 cm

上述の値を (4.3) 式に代入し W_s を求める。

$$W_s = 0.0012 I^2 \times 10^{-6} \dots\dots\dots (4.4)$$

d) 流動摩擦損⁴⁵⁾ ; W_f (W/cm)

$$W_f = \frac{f r \rho_{LN} A c v^3}{2 r_h} \times 10^{-7} \dots\dots\dots (4.5)$$

ここに $f r = 0.0014 + 0.125 (Re)^{-0.32}$, Fanning の摩擦係数

Re ; レイノルズ数, r_h ; 流体半径 (cm) , ρ_{LN} ; 液体窒素密度 (g/cm³)

A ; 流路断面積 (cm²) , v ; 冷媒流速 (cm/sec)

< 4.2.5 > ケーブルの冷却方式

このケーブルの送電容量は大容量であるので系統の信頼性を考慮して夫々独立の冷凍機と組合せて2回線布設し常時は1/2 負荷運転を行い, 1回線が故障の場合でも残りの回線で所定の電力が送電出来るように考える。一方冷凍機は定格容量の2倍を用意し1台の冷凍機が故障の場合にはバルブ操作により両回線の冷却が可能のように考慮する。

ケーブル内における冷媒の強制循環の方向と冷凍機の配置についての代表例を第4.1図⁴⁶⁾に示した。図では2回線布設の中で1回線だけの配置を示す。a) では冷媒の循環方向は, 夫々のコアの導体内冷媒流路を往路にパイプとコア外部の空間を帰路として使用する。b) では冷媒をコアの内部と外部で同方向に流し, c) では冷媒をコア外部の空間にのみ流して絶縁層を経て導体を冷却する。なお, b) , c) では冷媒の帰路として別に断熱されたパイプを必要とする。

< 4.2.6 > 導体内冷媒流路⁴⁷⁾の決定

各絶縁紙について導体半径が第4.3表のように求められたので次に導体断面積 ; A (mm²) と導体内冷媒流路半径 ; r_i (cm) を求める。送電々圧と送電容量を夫々 500 KV, 5,000 MVAとし冷却方式を第4.1図のa) として r_i をパラメータにとって A を変え冷媒の熱負荷と流動抵抗を変化させ, 導体内冷媒流路の流速 ; v_i (cm/sec) , 総圧力降下 ; ΔP_T (atm) , 及び総発生損失 ; W_T (kw) と r_i の関係を求める。

冷媒流量は

$$M = \frac{L \times W}{\rho_{LN} \cdot C_p \Delta T} \dots\dots\dots (4.6)$$

$$W_T = W \cdot L / 1,000 \dots\dots\dots (4.7)$$

ここに M ; 冷媒流量 (cc/sec), L ; 線路長 (cm), W ; 発生損 (W/cm)

$$W = 3(W_c + W_d + W_s + W_{f1}) + W_p + W_{TH} + W_{THS} + W_{f2} \dots\dots\dots (4.8)$$

W_{f1} ; 導体内冷媒流路摩擦損 (W/cm), C_p ; 冷媒比熱 (J/gk)

W_{f2} ; コア外側冷媒流路摩擦損 (W/cm), ΔT ; 冷媒の許容温度上昇 (K)

冷媒の往路, 帰路の温度上昇を夫々 $\Delta T_1, \Delta T_2$ (K) として

$$\Delta T_1 = \frac{3(W_c + \frac{1}{2}W_d + W_s + W_{f1})}{M \rho_{LN} C_p} L \dots\dots\dots (4.9)$$

$$\Delta T_2 = \frac{(W_p + \frac{3}{2}W_d + W_{TH} + W_{THS} + W_{f2})}{M \rho_{LN} C_p} L \dots\dots\dots (4.10)$$

圧力降下 ΔP (atm/cm) は次式⁴⁸⁾により往路と帰路について計算する。

$$\Delta P = (f r v^2 \rho_{LN} / 2 r_h) \times 9.87 \times 10^{-7} \dots\dots\dots (4.11)$$

$$\Delta P_T = \Delta P_1 + \Delta P_2 \dots\dots\dots (4.12)$$

ここに v ; 冷媒流速 (cm/sec), $v_1 = M / 3\pi r_1^2$ $v_2 = M / \pi (r_o^2 - 3r_i^2)$

ΔP_T ; 総圧力降下 (atm/cm), ΔP_1 ; 往路圧力降下, ΔP_2 ; 帰路圧力降下

$$Re_1 = \frac{\rho_{LN} v_1 2r_1}{\nu}, Re_2 = \frac{\rho_{LN} v_2 2(r_o^2 - 3r_i^2)}{\nu(r_o + 3r_i)}$$

ν ; 冷媒の粘度 (poise), r_h ; 流体半径 (cm)

$$2r_h = r_1 \quad (\text{往路}) \quad 2r_h = \frac{(r_o^2 - 3r_i^2)}{(r_o + 3r_i)} \quad (\text{帰路})$$

r_1 ; 冷媒流路半径,

r_i ; コア半径, r_o ; パイプ内半径 (cm)

摩擦損 W_{f1}, W_{f2} は冷媒流速の関数であるので流速が求められないと計算出来ない。しかし流速は流量の, 流量は総損失の関数であるので最初 W_{f1}, W_{f2} がゼロの場合の W_0 から冷媒の流量, 流速を求め次にこの流速における W_{f1}, W_{f2} を求め

$$W_1 = W_0 + 3W_{f1} + W_{f2}$$

として W_0 を補正して W_1 とする。これを W_1 が一定値に収斂するまで繰返して W_{f1}, W_{f2} を考慮した場合の $W_T, v_1, v_2, \Delta P_T$ を求める。電算機の計算の手順を第 4.2 図に示した。

線路長を 500 m とした場合に各絶縁紙についての計算結果を第 4.3, 4.4, 4.5 図に示した。これ等の結果より各絶縁紙と熱絶縁方式毎に ΔP_T と W_T の最小を与える r_1 が存在する。この中で, ΔP_T は最大ストレスを大きく r_1 を大きくとれる絶縁紙程小さくなりクラフ

ト紙の場合に最小になる。各絶縁紙と熱絶縁方式毎にこれ等の ΔP_T 、 W_T の最小値とそれを与える r_1 をパラメータと共に第4.4、4.5表に示した。なお熱絶縁方式の差は図中の v_1 、 ΔP_T 、 W_T の大きさの差として現わされる。

r_1 を大きくすると導体断面積が小さくなるので直流抵抗が増加するが交流抵抗は表皮効果のために r_1 と共に増加せず、 r_1 の或る値までは減少して最小値を示す。それ故導体損 W_c にも最小値が表われる。一方 W_{f1} も r_1 の関数であって W_c の最小値を与える r_1 とは異なる r_1 の値でやはり最小値を示す。然し W_c に比較して W_{f1} は1桁小さい値であり又他の熱損失は r_1 と無関係に決まるので W_c の最小を与える r_1 と W_T の最小を与える r_1 とは等しくなる。

一方 ΔP_T は v_1 と r_1 の関数で v_1 は M の関数であるが M は W_c の最小で最小となりそれより r_1 の増加に伴う W_c の増加で増加する。しかし v_1 と ΔP_T は M の増加で単調に増加せず r_1 のある値までは減少するので W_T の最小を与える r_1 よりも ΔP_T の最小を与える r_1 の方が大きくなる。送電容量5,000 MVA、ケーブル長500 mの一例を第4.6図に示した。

上述のように ΔP_T の最小を与える r_1 は W_T の最小を与えないので何れの最小を与える r_1 を採用するのが経済的になるか、夫々の r_1 について10年間⁴⁹⁾運転費と^{50,51)}冷凍機資本費(千円/MVA・Km)を求める。

10年間運転費は冷凍機の運転電力量として算出された次式で表わされる。

$$C_{01} = \frac{W_T P_{r2} H_r P_e}{\eta L_r P_s} \dots\dots\dots (4.13)$$

ここに C_{01} ; 10年間運転費(千円/MVA・Km) , W_T ; ケーブル熱負荷(kW)

L_r ; 冷凍機間隔(Km) , η ; 冷凍機の効率(1/9)

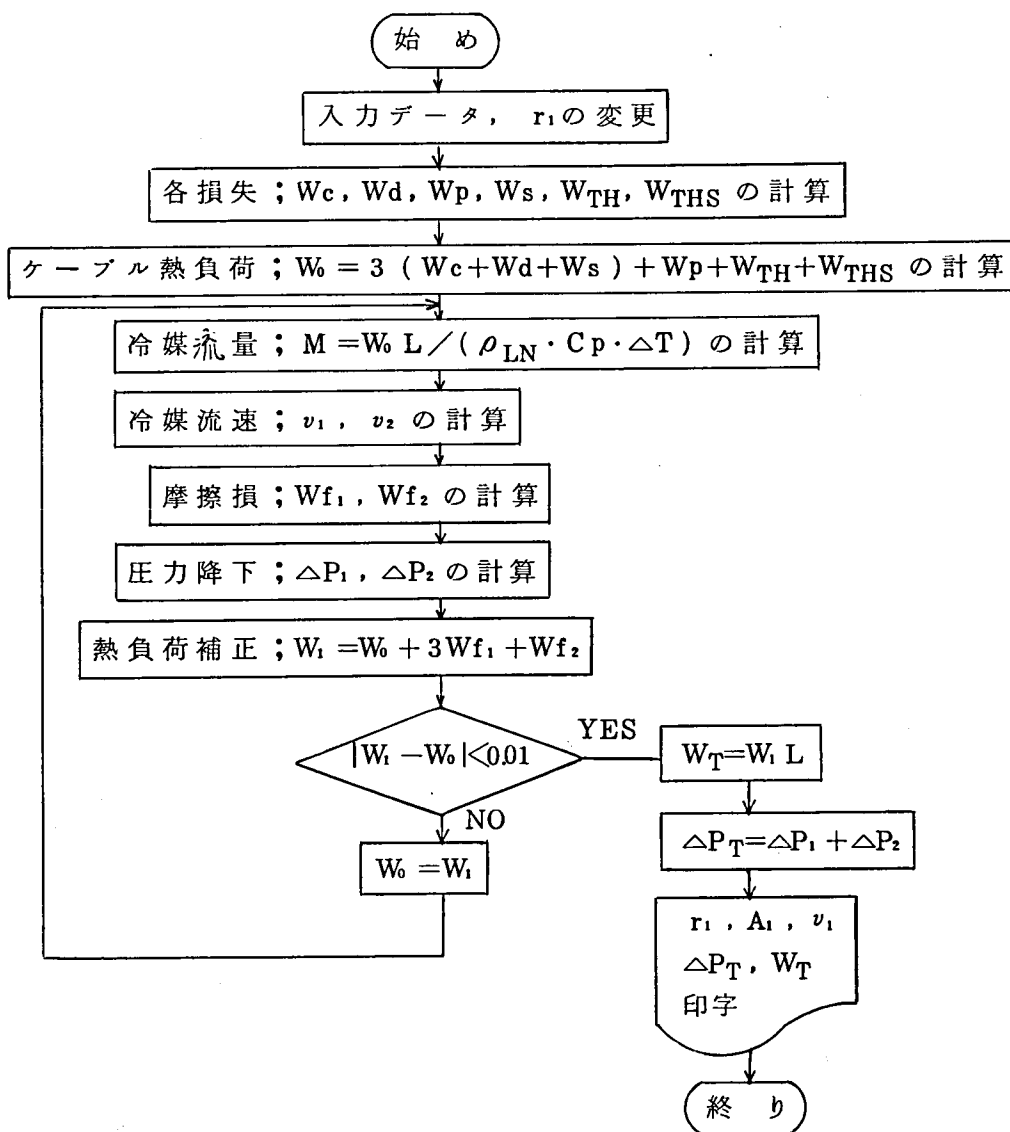
H_r ; 10年間時間(87,600 h) , P_{r2} : 負荷率(0.8)

P_e ; 電力料(5 ¥/kWh) , P_s : 送電々力(MVA)

一方冷凍機資本費 C_{02} (千円/MVA・Km)は

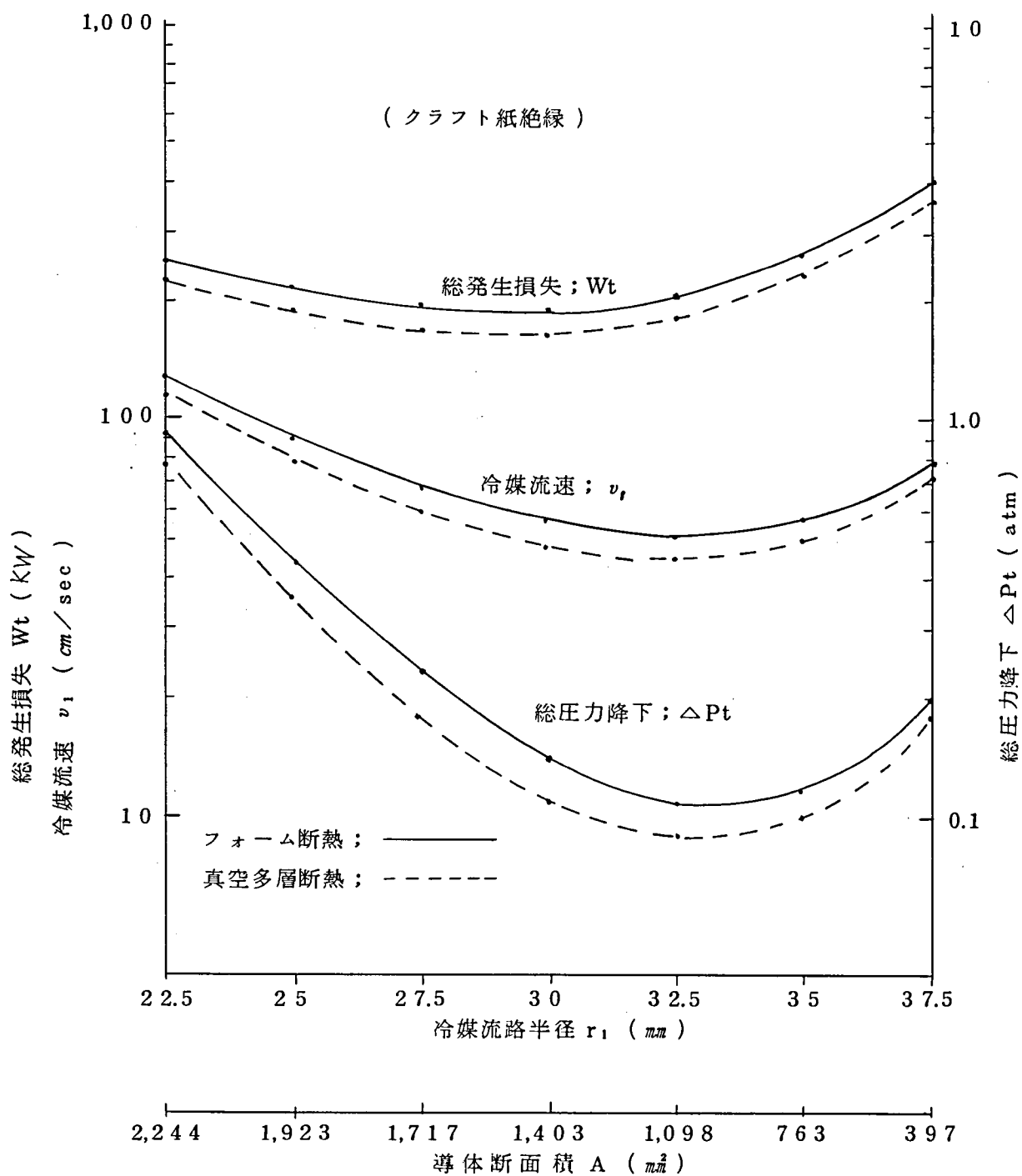
$$C_{02} = \frac{2 \times 27,000 (W_T/10)^{0.75}}{L_r \cdot P_s} \dots\dots\dots (4.14)$$

フォーム断熱でクラフト紙絶縁冷却方式a), b) とポリエチレン紙絶縁冷却方式c)の場合の C_{01} 、 C_{02} を計算し第4.7図に示した。これより冷凍機費と10年間運転費は4,000 MVA以上の送電容量でa), b)とも差が出ており W_T の最小を与える r_1 を採用するのが経済的になる。

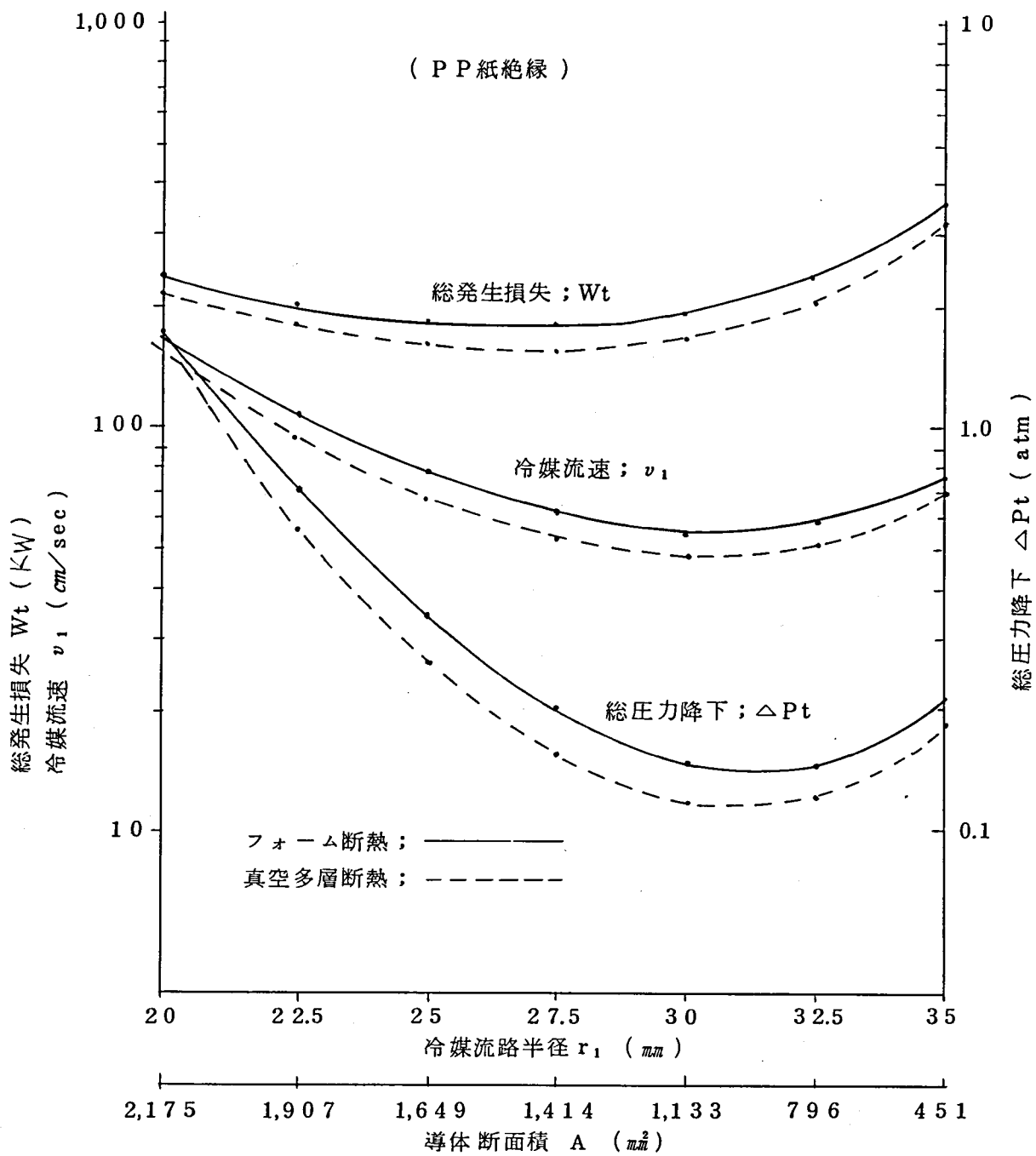


第 4.2 図 冷媒流路半径 r_1 毎の冷媒流速 v_1 , 総圧力降下 ΔP_T

総発生損失 W_T 計算のフローチャート



第 4.3 図 冷媒流路半径 r_1 と総発生損失 W_t
冷媒流速 v_1 , 総圧力降下 ΔP_t の関係



第 4.4 図 冷媒流路半径 r_1 と総発生損失 W_t
冷媒流速 v_1 , 総圧力降下 ΔP_t の関係

第 4.4 表 総圧力降下 ΔP_T の最小を与える

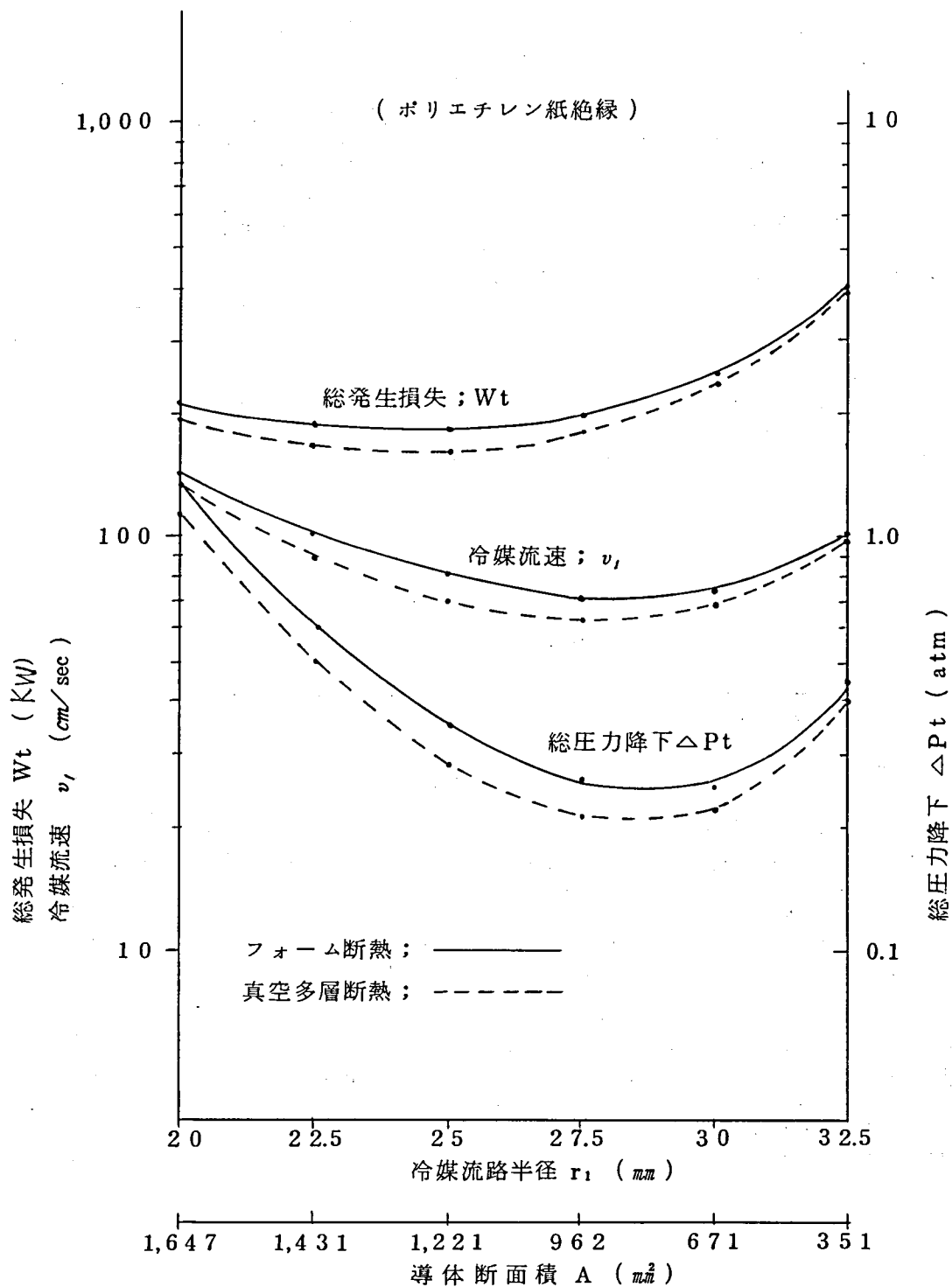
冷媒流路半径 r_1 (ケーブル長500m)

項 目	絶縁紙	クラフト紙		P P 紙		ポリエチレン紙	
	熱 絶 縁	フォーム 断 熱	真空多層 断 熱	フォーム 断 熱	真空多層 断 熱	フォーム 断 熱	真空多層 断 熱
流 路 半 径 r_1 mm		3 2.5	3 2.5	3 2.5	3 2.5	3 0.0	2 7.5
流 速 v cm/sec		5 0.2	4 4.5	5 7.6	5 1.9	7 5.5	6 3.9
総 圧 力 降 下 ΔP_T atm		0.1 1 4	0.0 9 2	0.1 4 6	0.1 2 1	0.2 5 9	0.2 1 2
導 体 断 面 積 A mm ²		1,0 9 8		7 9 6		6 7 1	9 6 2
素 線 直 径 S mm		2.5 0		1.8 4		1.6 6	2.5 0
占 積 率 P_f %		5 9.4		6 0.2		6 0.2	5 9.6

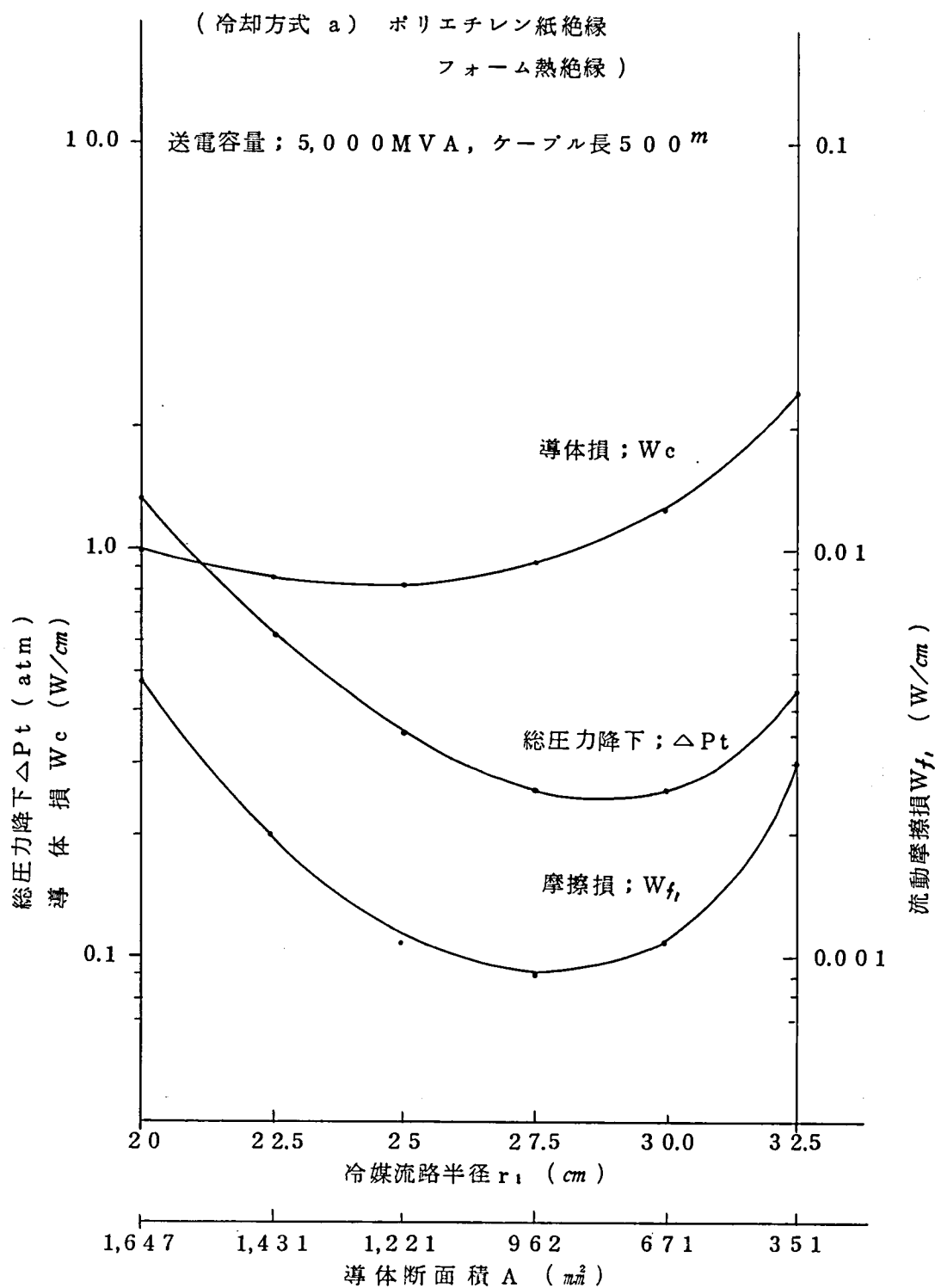
第 4.5 表 総発生損失 W_T の最小を与える

冷媒流路半径 r_1 (ケーブル長500m)

項 目	絶縁紙	クラフト紙		P P 紙		ポリエチレン紙	
	熱 絶 縁	フォーム 断 熱	真空多層 断 熱	フォーム 断 熱	真空多層 断 熱	フォーム 断 熱	真空多層 断 熱
流 路 半 径 r_1 mm		3 0.0	3 0.0	2 7.5	2 7.5	2 5.0	2 5.0
総 損 失 W_T KW		1 8 4	1 6 1	1 7 8	1 5 6	1 8 7	1 6 4
導 体 断 面 積 A mm ²		1,4 0 3		1,4 1 4		1,2 2 1	
素 線 直 径 S mm		3.3 4		3.5 0		3.3 4	
占 積 率 P_f %		5 8.8		6 0.0		5 8.9	
導 体 損 W_c W/cmph		0.6 8 6		0.7 0 2		0.7 8 6	



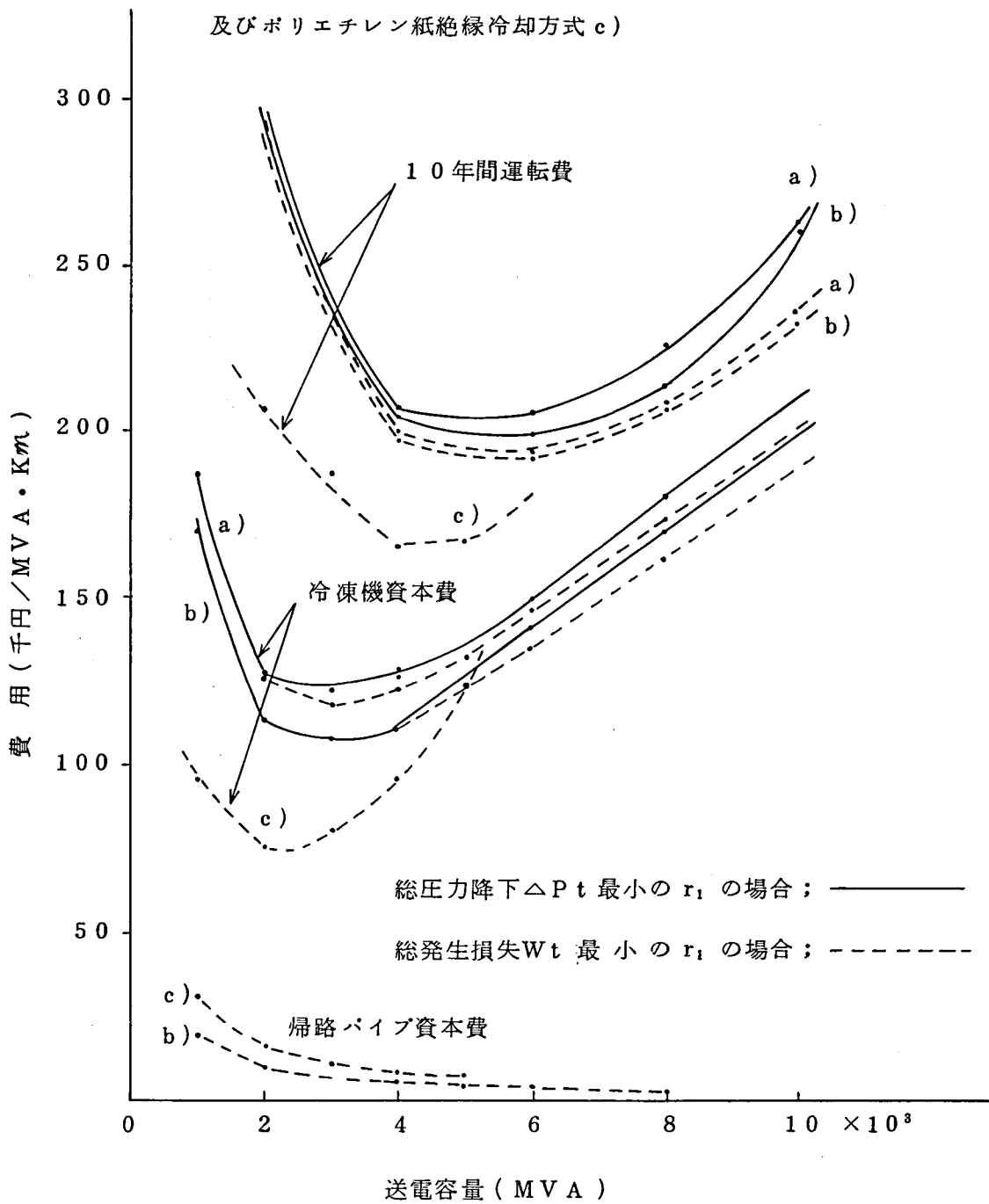
第 4.5 図 冷媒流路半径 r_1 と総発生損失 W_t
冷媒流速 v_1 , 総圧力降下 ΔP_t の関係



第 4.6 図 冷媒流路半径 r_1 導体損 W_c , 総圧力降下 ΔP_t , 摩擦損 W_{fi} の関係

フォーム断熱，クラフト紙絶縁冷却方式 a)， b)

及びポリエチレン紙絶縁冷却方式 c)



第 4.7 図 冷却方式別の各費用

冷却方式 c)では冷却は全てコアの外側から絶縁層を通して行われるので、 W_T を最小にする r_1 を採用すれば良く r_1 は第 4.5 表のようになる。

§ 4.3 冷却方式とケーブル内温度分布

ケーブル内の冷媒の温度上昇と圧力降下は (4.9) , (4.10) , (4.11) 式で求められこれ等より冷凍機の容量と冷凍機間隔が一応求められる。しかし実際のケーブルでは冷媒と被冷却体との間には境膜熱抵抗が存在し又テープ絶縁体にも熱抵抗が存在するので冷凍機の容量と間隔を求めるに当りこれ等の熱抵抗を考慮しなければならない。

ケーブル内の熱等価回路を第 4.8 図のようにし導体内冷媒流路の冷媒温度 ; T_{o1} , (K) , 導体温度 ; T_c , (K) , コア外側の冷媒流路の冷媒温度 ; T_{o2} , (K) を求める。各部の熱平衡から次式が成立する。

$$W_d = W_{d1} + W_{d2}$$

$$T_c - T_{o1} = R_{fc} (W_c + W_{d1})$$

$$T_c - T_{o2} = -\frac{R_i}{2} W_{d1} + \left(-\frac{R_i}{2} + R_{fs} \right) W_{d2} + R_{fs} W_s$$

$$M_1 \rho_{LN} C_p \frac{dT_{o1}}{dX} = W_{d1} + W_c + W_{f1} \dots\dots\dots (4.15)$$

$$T_\infty - T_p = R_h W_h$$

$$T_p - T_{o2} = R_{fp} (W_p + W_h)$$

$$M_2 \rho_{LN} C_p \frac{dT_{o2}}{dX} = 3W_{d2} + 3W_s + W_p + W_h + W_{f2} \dots\dots (4.16)$$

ここに 温度 ; (K) ; T_∞ ; 外気温度 , T_p ; パイプ温度

熱抵抗 ; (cmK/W) , R_{fc} ; 導体内冷媒流路境膜熱抵抗

R_{fc} ; コア表面境膜熱抵抗

R_{fp} ; パイプ内面境膜熱抵抗

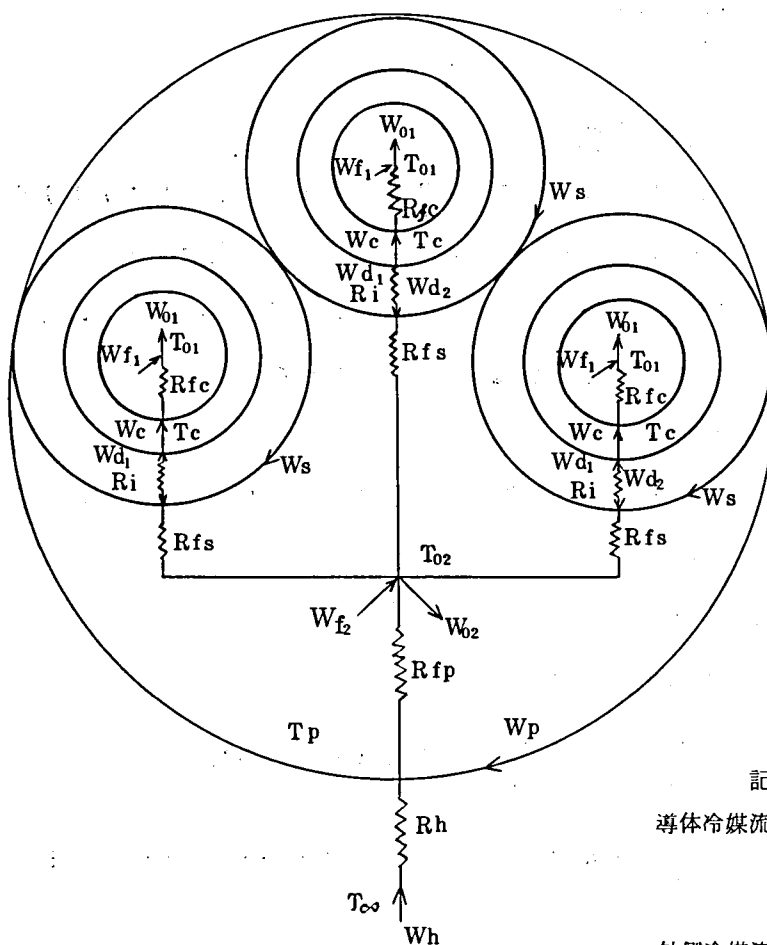
R_i ; 絶縁体熱抵抗 , R_h ; 熱絶縁及びスペーサの合成熱抵抗

M_1 ; 導体冷媒流路内冷媒流量

M_2 ; コア外側 "

一方 R_h は次式で表わされる。

$$R_h = \frac{1}{G_{TH} + G_{THS}}$$



記号の説明

導体冷媒流路内 熱損失: W_{01}

摩擦損: W_{f1}

冷媒温度: T_{01}

コア外側冷媒流路内 熱損失: W_{02}

摩擦損: W_{f2}

冷媒温度: T_{02}

導体損: W_c , シース損, W_s , パイプ損: W_p

誘電体損: W_d , 侵入熱: W_h

導体温度: T_c , パイプ温度, T_p , 外気温度: T_c

境膜熱低抗

導体冷媒間: R_{fc}

コア // : R_{fs}

パイプ // : R_{fp}

絶縁体熱低抗: R_i

熱絶縁 // : R_h

第 4. 8 図 熱等価回路

ここに

$$G_{TH} = \frac{2\pi k_1}{\ln \frac{r_8}{r_7}}, \quad G_{THS} = \frac{4\pi k_s (r_8 - r_7) t_s}{L_s L_p \ln \frac{r_8}{r_7}}$$

G_{TH} ; 熱絶縁のヒートコンダクタンス (W/cm K)

G_{THS} ; スペーサの " (")

k_1 ; 熱絶縁の熱伝導率 (W/cm K)

k_2 ; スペーサの " (")

L_p ; パイプ長さ (cm), r_7 , r_8 ; 熱絶縁層内半径, 外半径 (cm)

上述の熱平衡式より冷却方式 a), b) について

$$T_{01}(X) = C_1 e^{\lambda_1 X} + C_2 e^{\lambda_2 X} + A + B \quad \dots\dots\dots (4.17)$$

$$T_{02}(X) = C_1 \left(1 + \frac{\lambda_1}{a_1}\right) e^{\lambda_1 X} + C_2 \left(1 + \frac{\lambda_2}{a_2}\right) e^{\lambda_2 X} + A \quad \dots\dots\dots (4.18)$$

$$T_c(X) = C_1 (1 + \lambda_1 R_{fc} \rho_{LN} C_p M_1) e^{\lambda_1 X} \\ + C_2 (1 + \lambda_2 R_{fc} \rho_{LN} C_p M_1) e^{\lambda_2 X} - R_{fc} W f_1 + A + B \quad \dots\dots (4.19)$$

冷却方式 c) について

$$T_{02}(X) = C_1 e^{-a_2 X} + A' \quad \dots\dots\dots (4.20)$$

$$T_c(X) = T_{02}(X) + \left(\frac{R_i}{2} + R_{fs}\right) W_d + R_{fs} W_s + (R_i + R_{fs}) W_c \quad \dots (4.21)$$

ここに C_1 , C_2 は積分常数

$$a_1 = \frac{1}{\rho_{LN} C_p M_1 (R_{fc} + R_i + R_{fs})}, \quad a_2 = \frac{1}{\rho_{LN} C_p M_2 (R_H + R_{fp})}$$

冷媒流量はコア内外で等しいものとする。

$$3 M_1 = M_2$$

冷却方式 a) について

$$\lambda_1, \lambda_2 = \frac{a_2 \pm \sqrt{a_2^2 + 4 a_1 a_2}}{2} \quad \dots\dots\dots (4.22)$$

冷却方式 b) について

$$\lambda_1, \lambda_2 = \frac{-(2 a_1 + a_2) \pm \sqrt{(2 a_1 + a_2)^2 - 4 a_1 a_2}}{2} \quad \dots\dots\dots (4.23)$$

$$A = \{3(W_c + W_d + W_{f1} + W_s) + W_{f2}\} (R_H + R_{fp}) + W_p R_H + T_H$$

$$B = W_c (R_i + R_{fs}) + W_d \left(\frac{R_i}{2} + R_{fs}\right) + W_s R_{fs} + W_{f1} (R_{fc} + R_i + R_{fs})$$

$$A' = \{ 3 (W_c + W_d + W_s) + W_{f2} \} (R_H + R_{fp}) + W_p R_H + T_H$$

なお R_{fc} , R_{fs} , R_{fp} は次式⁵²⁾

$$\begin{aligned} Nu &= 0.0023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \\ &= \alpha_{ci} Dh / \lambda_{ci} \dots\dots\dots (4.24) \end{aligned}$$

ここに Nu ; ヌセルト数, Re ; レイノルズ数, Rr ; プラントル数

α_{ci} ; 熱伝達率 ($W/cm^2 K$), λ_{ci} ; 冷媒の熱伝導率 ($W/cm K$)

Dh ; 流体外径 (cm)

を用いて夫々の流路について計算する。

$$\begin{aligned} R_{fc} &= \frac{1}{2\pi r_1 \alpha_{c1}}, \quad R_{fs} = \frac{1}{2\pi r_2 \alpha_{c2}}, \quad R_{fp} = \frac{1}{2\pi r_3 \alpha_{c2}} \\ \alpha_{c1} &= \frac{\lambda_{ci} Nu}{2r_1}, \quad \alpha_{c2} = \frac{\lambda_{ci} Nu (r_2 + 3r_3)}{2(r_2^2 - 3r_3^2)} \end{aligned}$$

§ 4.4 冷却方式と送電容量, 冷却距離

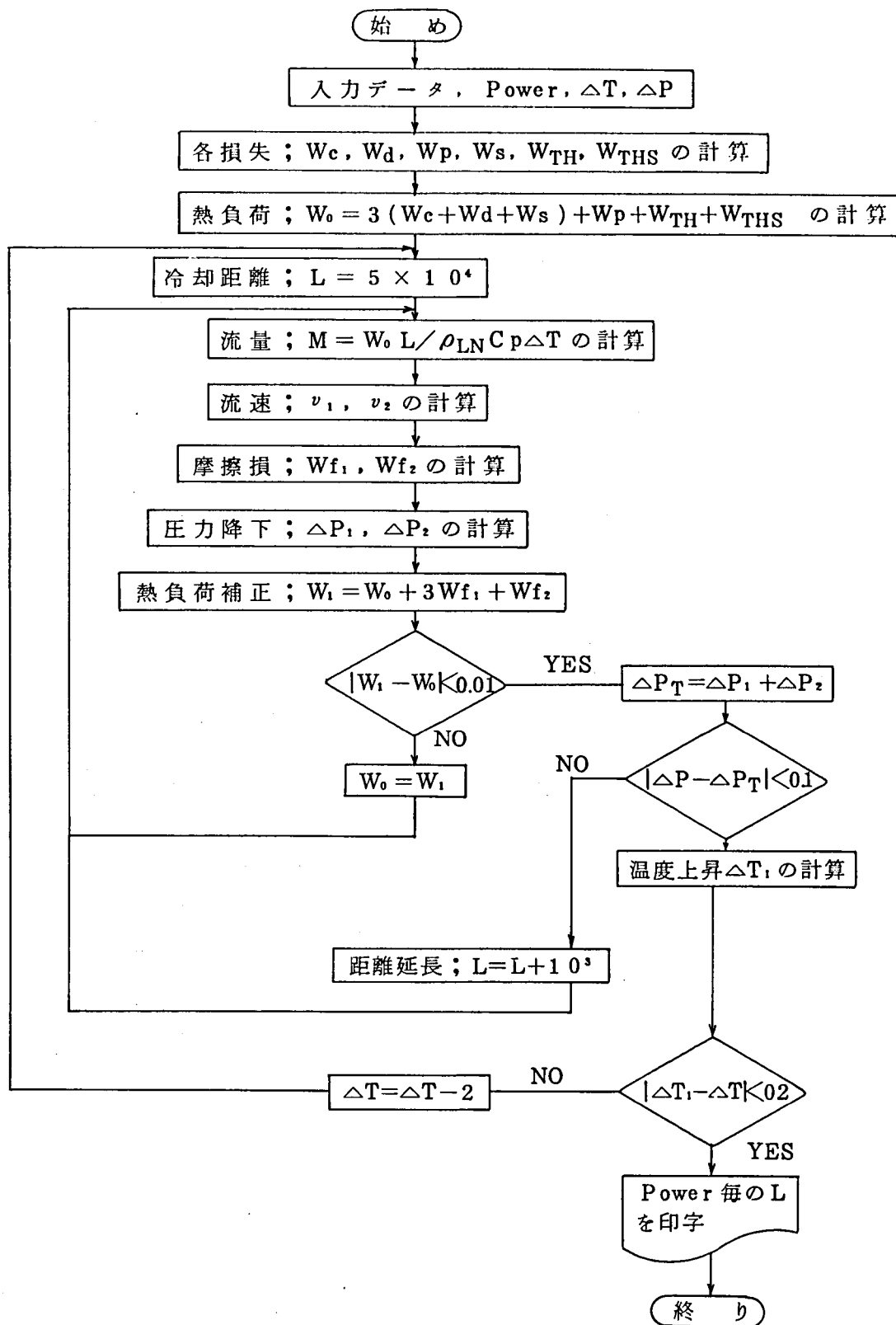
(4.17) ~ (4.19) 式により各冷却方式における冷媒温度と導体温度が求められ (4.11) 式により冷媒の圧力降下が求められるので, 冷媒の温度上昇と圧力降下を $\Delta T = 25 K$, $\Delta P = 10 atm$ とし <4.22> の各絶縁紙について冷却方式毎の送電容量と冷却距離を求める。

ケーブル入口の液体窒素の温度と圧力を夫々 $70 K$, $15 atm$ とするとケーブル出口の温度の圧力は $95 K$, $5 atm$ になり, 液体窒素はケーブル出口でも過冷却になっているので熱的電氣的に安定域にある。

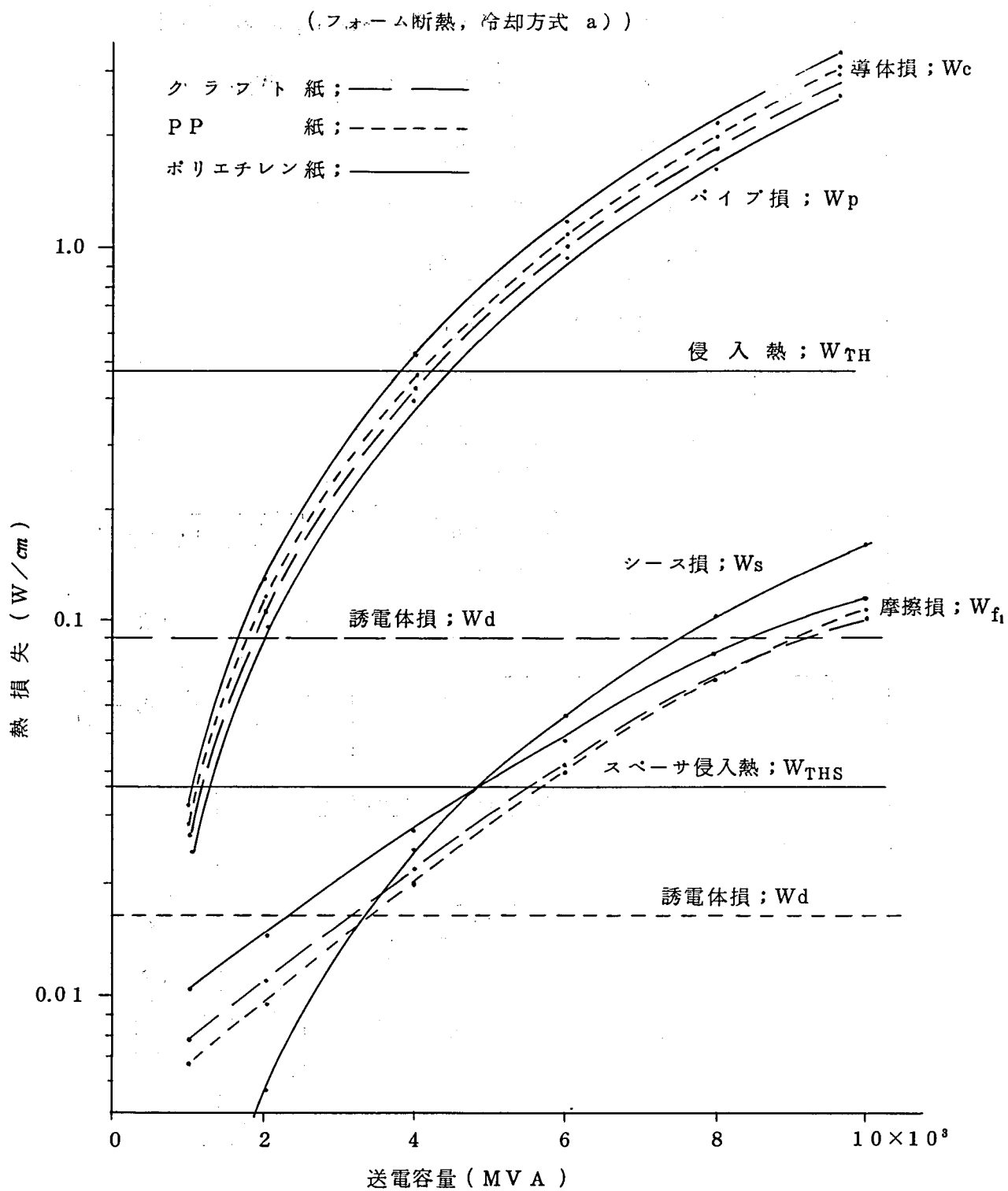
電算機による計算の手順を第 4.9 図に示す。先づ冷凍機間隔 L を $500 m$ に設定し第 4.2 図と同様な方法で W_{f1} , W_{f2} を計算して W_i を求める。冷媒の圧力降下 ΔP_T が ΔP の制限内にある事を確かめ乍ら冷凍機間隔を伸ばして行き圧力降下 ΔP を与えるケーブル長が冷凍機間隔になる。冷媒の温度上昇が ΔT を越える場合には ΔT から $2 K$ ずつ減じて冷媒流量 M を増加させて, 上と同じ手順にて冷凍機間隔を求める。

<4.4.1> 冷却方式 a) の場合

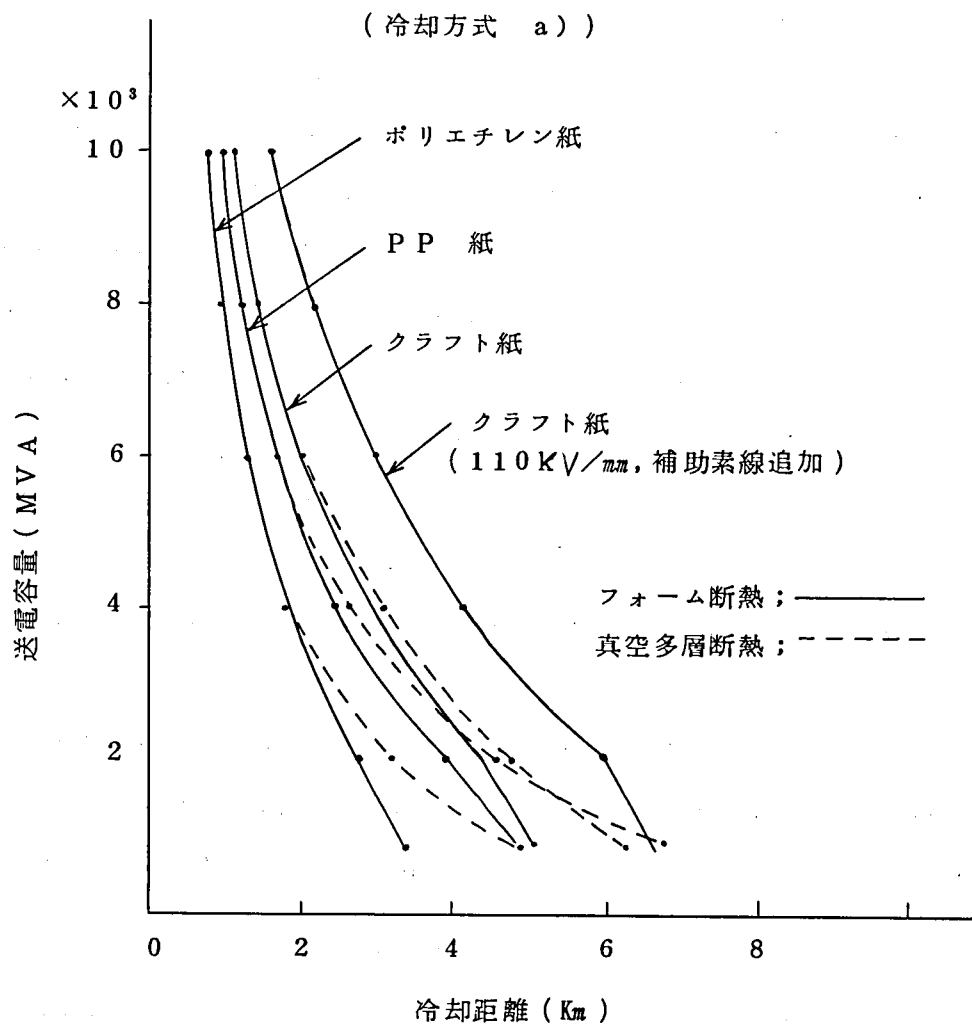
フォーム断熱の場合に各送電容量毎の冷却距離を求めそれよりケーブル単位長さ当りの熱負荷と送電容量の関係を求め第 4.10 図に示した。なお送電容量に対して一定の W_{TH} , W_{THS} W_d も図中に示した。ポリエチレン紙は W_d は小さく図中に示されない。熱負荷の中最大の W_c はポリエチレン紙, PP 紙, クラフト紙の順に小さく, W_c を含む導体内冷媒流路の熱



第 4.9 図 冷却距離 L を求めるフローチャート



第 4.10 図 熱損失と送電容量



第 4.1.1 図 送電容量と冷却距離

負荷を取り去るために生じる Wf_1 はクラフト紙とPP紙とは大差なくポリエチレン紙が最大となる。一方 Wf_2 は小さく無視される。クラフト紙は Wd が最大であるにも拘らず最大ストレスを大きくとれるので絶縁厚を減少させ、導体断面積を大きく出来るから Wc が最小になる。その上 r_1 も最大にとれるので、最大の冷却距離が得られる。なお真空多層断熱の場合にも同様な関係が成立する。

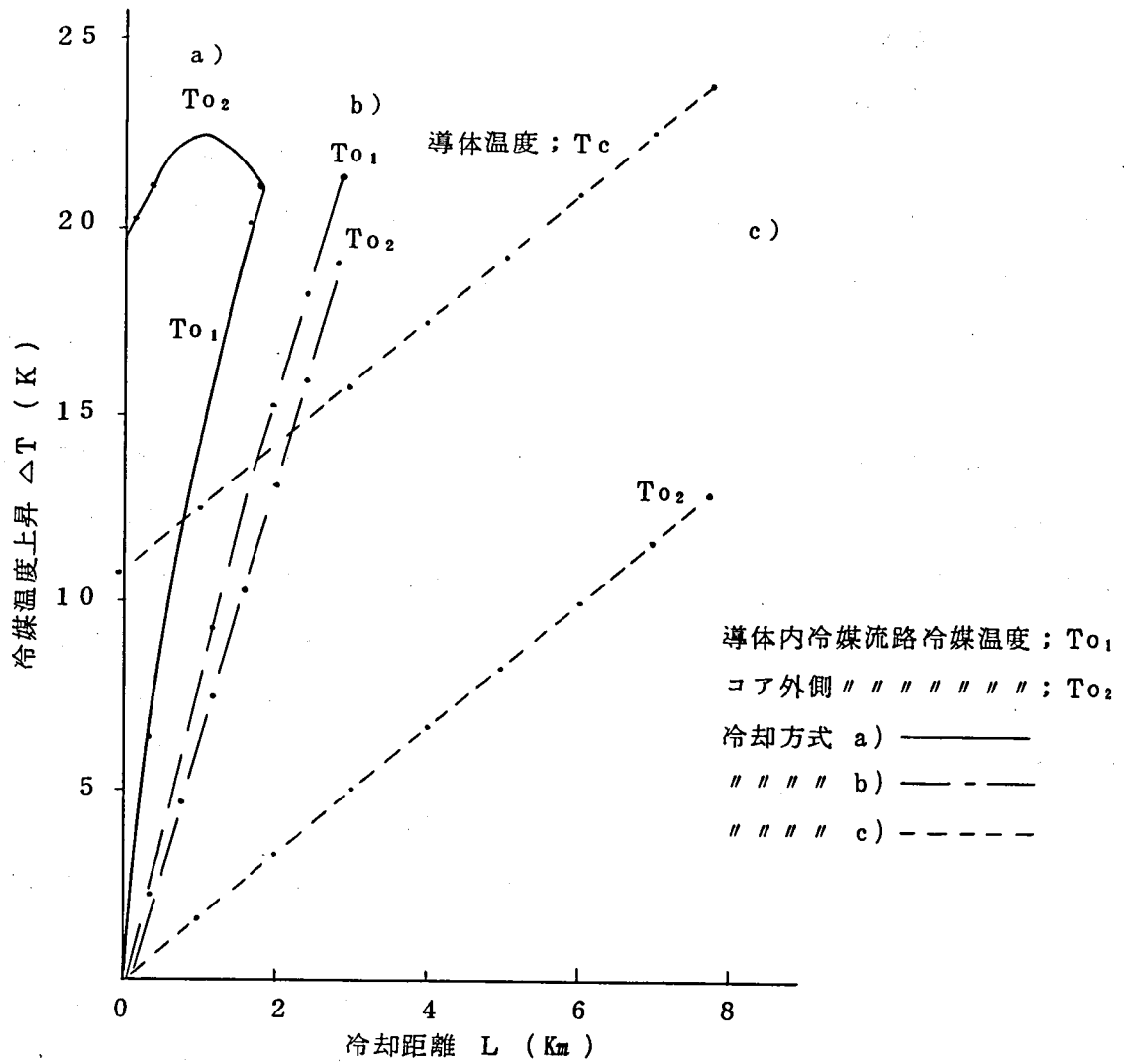
第4.1 1図に送電容量と冷却距離の関係を示す。5,000 MVAの送電容量では熱絶縁方式の差による冷却距離の差が僅かであるので経済的なフォーム熱絶縁が採用出来る。又冷媒の帰路としての断熱パイプも別に必要ないが、クラフト紙でも冷却距離は2.2 Kmしか得られない。それ故更に冷却距離延長の可能性を見るために、クラフト紙の衝撃破壊電位傾度を110 KV/mmに高めて絶縁厚を減らし導体断面積と冷媒流路を大きくする。＜4.2.6＞と同様にして W_T を最小にする r_1 を求め第3.6図のようにセグメント素線間に補助素線を追加させて断面積 A を増加させ導体抵抗 R ($\mu\Omega/cm$)を低下させる。この場合の r_1 , A , S , R 等の値を第4.6表に示した。このようにすると総合した断面積増加は25%になり導体抵抗は21%減少する。しかも r_1 は30 mmから37.5 mmに大きくすることが出来る。この場合の冷却距離を求め第4.1 1図に示した。5,000 MVAでの冷却距離は約55%増加して3.4 Kmになる。

この方式では(4.22)式から常に $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 < 0$ となるので(4.17)～(4.19)式⁵³⁾の温度分布に極大値が表われる事がある。この極大値を与える条件は電算機でシュミレーションを行い温度分布を求める事で容易に知る事が出来る。第4.1 2図に他の冷却方式と共

第4.6表 クラフト紙特性改善効果

項 目	クラフト紙	改 良 ク ラ フ ト 紙	
		補助素線なし	補助素線あり
衝撃破壊電位傾度 KV/mm	90	110	110
絶 縁 厚 mm	27	21	21
冷媒流路半径 r_1 mm	30.0	37.5	37.5
導 体 半 径 r_2 mm	43.0	49.8	49.8
素 線 直 径 S mm	3.34	3.10	3.10
補助素線直径 mm			1.10
導 体 断 面 積 A mm ²	1,403	1,584	1,755
導 体 抵 抗 R $\mu\Omega/cm$	0.0206	0.0178	0.0163

(4,000 MVA 送電, フォーム断熱
ポリエチレン紙絶縁)



第 4.1 2 図 ケーブル温度上昇分布

に温度上昇分布の1例を示した。コア外側の冷媒温度； $T_{o2}(x)$ に極大値が表われているが若しこの温度上昇値が $\Delta T = 25 \text{ K}$ の制限値を越える場合には冷媒の流量を熱負荷によるものより更に増加せねばならず $\Delta P = 10 \text{ atm}$ の制限から冷却距離は、極大値のない場合よりも短くなる。第4.11図のフォーム断熱でクラフト紙の曲線が2,000 MVAで折れているのはこのためである。

< 4.4.2 > 冷却方式 b) の場合

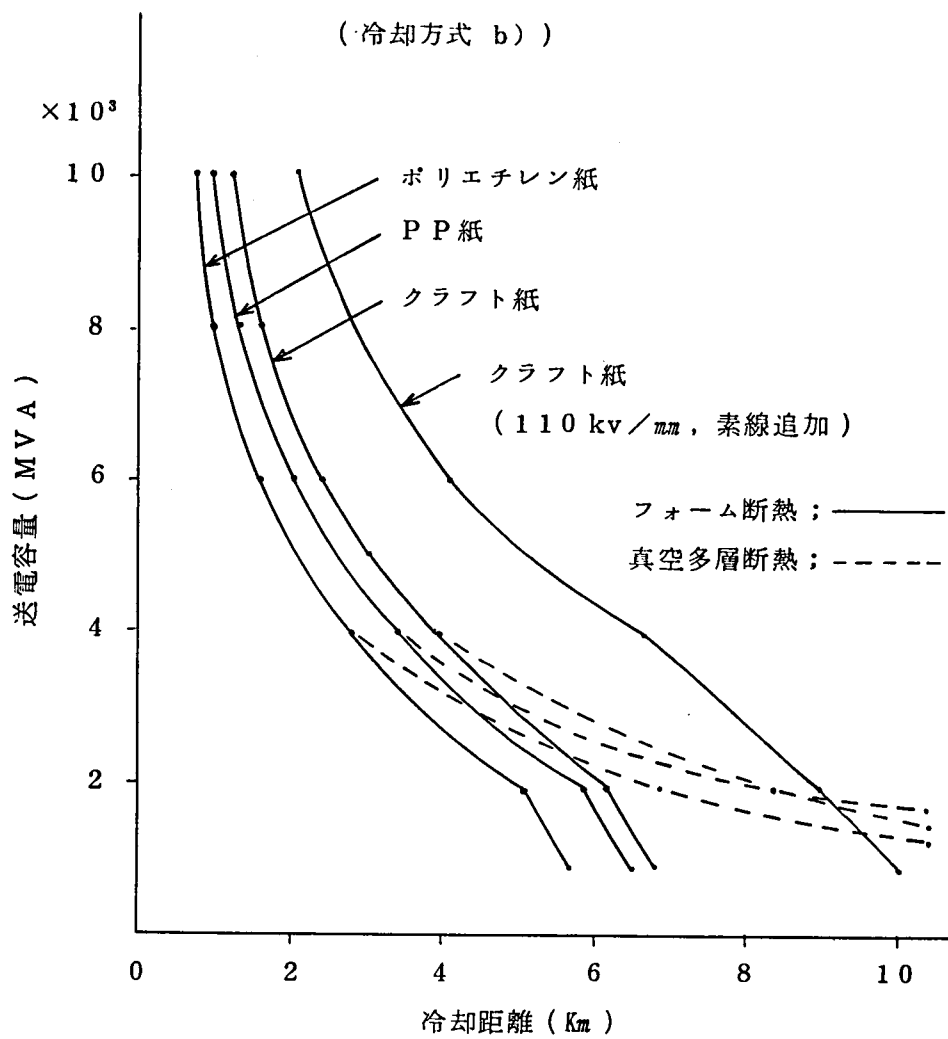
第4.13図に送電容量と冷却距離の関係を示した。計算に当りコア内外の冷媒の流量を等しくとりその大きさをコア内側と外側の熱負荷の中で大きい方に合わせた。この冷却方式ではコア内外の熱負荷を別々に冷却するため各流路の冷媒流量がa)の方式の場合よりも少なくその結果単位長当りの圧力降下と流動摩擦損が小さくなる。その上第4.12図に示すように温度分布に極大値が表われないためa)方式よりも冷却距離が長くなる。しかし5,000 MVAでクラフト絶縁でも3.1 Kmしか期待出来ない。それ故冷却方式a)と同じようにクラフト紙の衝撃電圧特性を高め補助素線を追加した第4.6表の導体の場合の冷却距離を求め第4.13図に示した。a)の場合よりも冷却距離の伸びが大で5,000 MVAで68%増加して5.2 Kmになる。一方冷媒帰路は2回線で1本を共有するのが経済的で帰路パイプの断面積を1回線の冷媒流路断面積の1.5倍にとると帰路パイプの半径は90 mmになり何れの送電容量でも冷却距離間の圧力降下は5 atm以内に押えられる。なお約10 cm厚のフォーム熱絶縁を施工すれば帰路パイプ内の冷媒の温度上昇は実用上無視出来る。土木工事費を除いた帰路パイプの費用⁵⁴⁾(千円/MVA・Km)を求め第4.7図に示した。この費用を加えてもb)の費用はa)よりも少ないが、帰路パイプを用いないで2回線中1回線を冷媒の帰路に使用し、事故時には健全回線をa)方式で冷却し送電する方法が考えられる。a)方式に切換えた場合の送電容量を第4.14図に示した。事故時でも5,000 MVAで70%が送電可能である。

第4.13図でフォーム断熱の場合に2,000 MVAで曲線が折れているのは、コア外側での冷媒の熱負荷が内側の熱負荷よりも大きくなったためで、 W_c が減少しても冷媒の流量が減少しないで ΔP の制限から冷却距離が伸びないためである。なお熱絶縁方式の差は4,000 MVA以上では見られない。

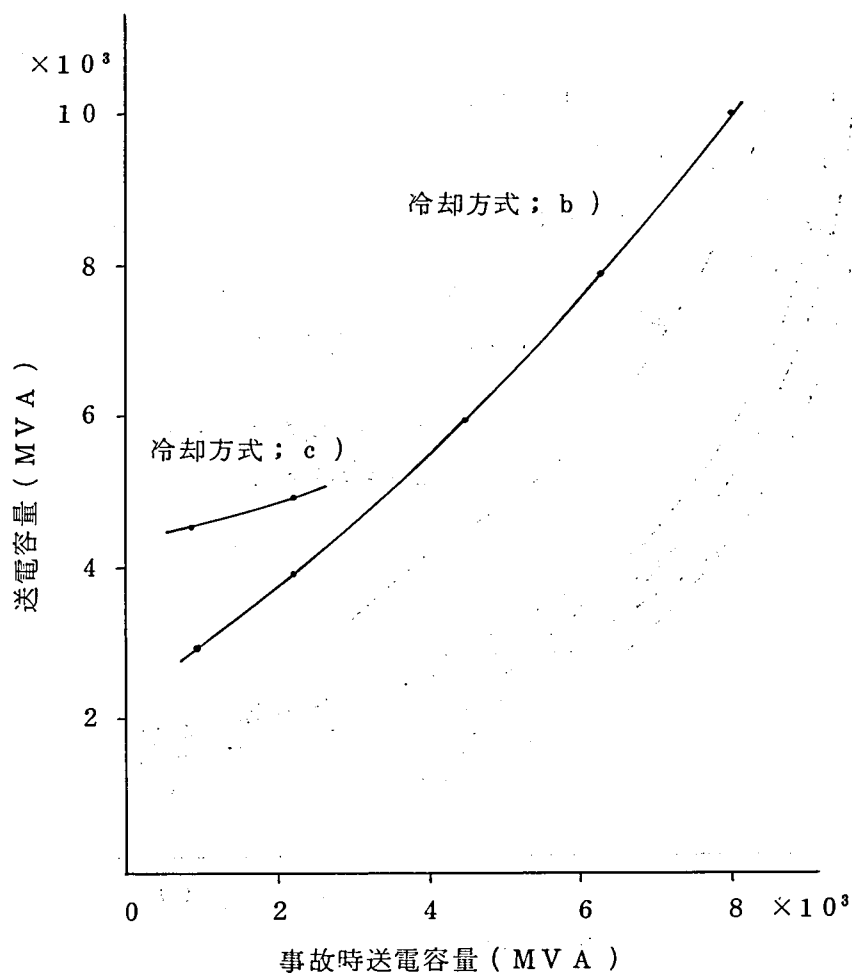
< 4.4.3 > 冷却方式 c) の場合

冷却方式c)ではコアの外部より間接的に導体を冷却しなければならないので $\Delta T = 25 \text{ K}$ の制限は第4.12図に示すように導体の温度上昇で押えられ

$$\Delta T = T_c(x) - T_L \dots\dots\dots (4.25)$$



第 4.13 図 送電容量と冷却距離



第 4.1 4 図 事故時送電容量

で与えられる。送電容量と冷却距離の関係を第 4.1 5 図に示した。各絶縁紙について送電容量の最大値は曲線が縦軸と交わる点で与えられる。ポリエチレン紙は第 4.5 表のように最大の W_c を与えるにも拘らず R_i と W_d が最小であるので a), b) 方式の場合とは逆に最長の冷却距離が得られる。他方式と差が出るのは 4,000 MVA 以下の送電容量でフォーム断熱の場合 4,000 MVA で 7.7 Km, 3,000 MVA で 13 Km の冷却距離が得られる。帰路パイプとして b) 方式と同じ条件で冷媒流路半径 16.2 mm のものが必要になる。帰路パイプ費, 10 年間運転費及び冷凍機費を第 4.7 図に示した。これ等を総合した c) 方式の費用は a), b) 方式に比して最低となっている。なお b) の場合と同様に事故時に a) に切替えた場合の送電容量を求め第 4.1 4 図に示した。c) では事故時の容量低下が大で 5,000 MVA では 46% しか送電出来ない。

§ 4.5 液体窒素冷却極低温ケーブルの経済性

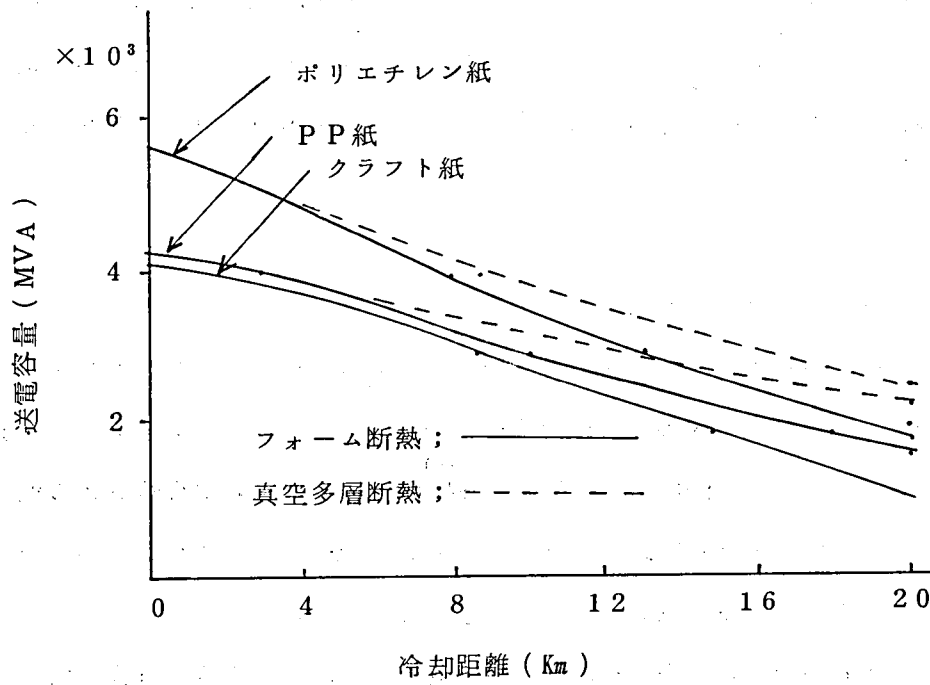
このケーブルは極低温で導体抵抗が低下する事を利用して大容量送電を行うものであるが、このケーブルの経済性を左右する要因の 1 つに冷凍機の効率が上げられる。液体窒素冷凍機の効率はカルノー機関で $1/2.5$, 実用機で $1/6 \sim 1/9$ 程度⁵⁵⁾ であって、これが導体抵抗の低下の利点を減少させる。第 4.7 図の 10 年間運転費はこの効率を $1/9$ として計算されているので極低温で発生した熱損失の 9 倍の冷凍機電力費を要した事になっている。

その他の要因として ΔP の制限から来る冷凍機間隔の減少とそれに伴う冷凍機費の増加が費用を増加させる。第 4.7 図より 10 年間運転費は a), b) 方式で 4,000 ~ 6,000 MVA の範囲が経済的であるが冷凍機費は 3,000 MVA に最小値が存在する。総合して 4,000 ~ 6,000 MVA の範囲が経済的になる。一方 c) 方式では 3,000 ~ 4,000 MVA が経済的である。

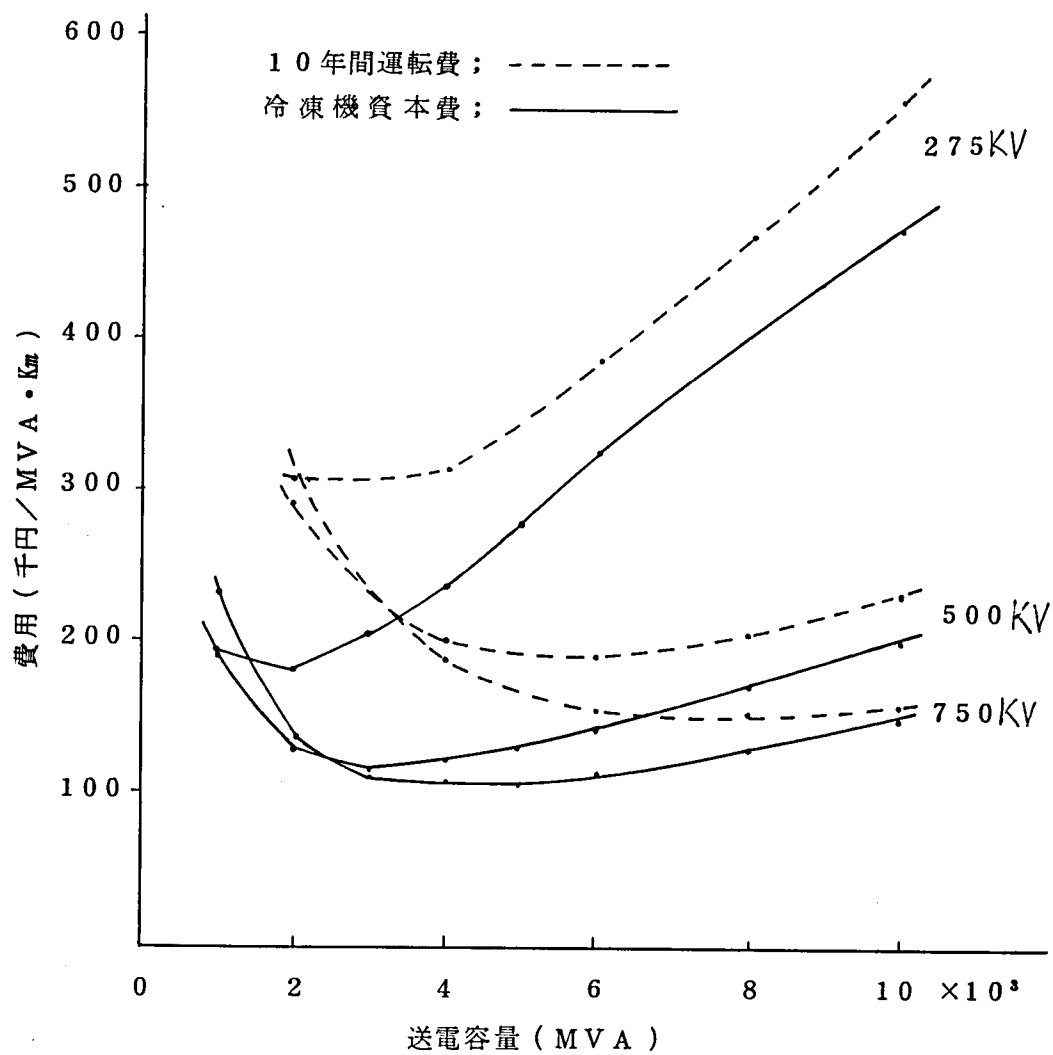
次に送電圧と経済性について検討する。電圧に拘らずケーブルコアの最大外径を 150 mm ϕ とすると低温圧力容器の寸法も電圧に無関係に一定となり、土木工事費も変らない。又ケーブルコアのコストも最大外径を一定にとると電圧によって大差がなくなる。それ故、経済性を論じるためには電圧別に冷凍機費と 10 年間運転費を比較すれば良い。これを第 4.1 6 図に示す。なお 275 KV と 750 KV ケーブルコアの設計は全て 500 KV ケーブルコアの設計方法に準じ、 W_T を最小にする r_i を採用した。図より 3,500 MVA 以上では冷凍機資本費と 10 年間運転費は高電圧になる程小さくなる。しかし 750 KV は電気絶縁材料と終端箱を含めた電気絶縁方法に問題が残っている。

一方、液体窒素冷却極低温ケーブルでは、他の大容量送電ケーブルと比較して 2,000 ~

(冷却方式 c)



第 4.15 図 送電容量と冷却距離



第 4.1.6 図 送電電圧別の費用

5,000 MVAの範囲で経済的であると云われ、それ以下では従来型ケーブルが、又それ以上では超電導ケーブルが有利となる。^{56~60)}又強制冷却された従来型ケーブルの1回線の送電容量は、約2,500 MVA^{61~64)}であるので2回線布設を行う極低温ケーブルは、これ以下の送電容量では従来型ケーブルよりもコスト高になる。しかし500 KVケーブルではコア外径、パイプ外径は従来のパイプタイプケーブルと大差なく、熱絶縁として安価なフォーム断熱を用いると資本費と土木工事費も殆んど変わらない。それ故1回線当りの送電容量が大きいこのケーブルでは(資本費+運転費)、(千円/MVA・Km)で比較すると、2,500 MVAの従来型ケーブルと、冷却方式a)、b)では同程度のコストで、又c)方式では約86%のコストで4,000 MVAの送電が出来る。一方このケーブルは信頼性を考慮して2回線布設し冷却系も必要量の2倍を設置するとしてコスト計算されているので、将来これ等の信頼性が高まればコストは大巾に低下するものと考えられる。

§ 4.6 要 約

冷体窒素冷却500 KV極低温ケーブルの設計を行い、冷却方式と送電容量の関係を求め、経済性についても検討し以下の結果を得た。

- (1) ケーブルコア外径を150 mm φに押えた場合に最も経済的なケーブル構造はケーブル内の冷媒圧力降下を最小にして冷凍機間隔を最大にするものでなく熱負荷を最小にする構造である。これにより各絶縁紙、熱絶縁方式及び冷却方式別に冷媒流路徑と導体断面積を求めた。
- (2) 熱等価回路によりケーブル内の温度分布を計算し冷媒の圧力降下と温度上昇の制限値より送電容量と冷却距離の関係を求めた。
- (3) 送電容量が4,000 MVA以上では熱絶縁方式の違いによる冷却距離の差は僅かであるので、経済的なフォーム熱絶縁が採用出来る。
- (4) 4,000~6,000 MVAでは絶縁耐力の大きいクラフト紙絶縁で冷媒の帰路パイプを省略し、冷媒をコアの内外で同方向に流した冷却方式b)が経済的である。
- (5) 3,000~4,000 MVAでは誘電体損と熱抵抗の小さいポリエチレン紙絶縁でフォーム熱絶縁を行い、冷媒をコアの外側にのみ流した冷却方式c)が経済的である。この場合3,000 MVAの冷却距離は1.3 Kmになり強制冷却された従来型ケーブルの2倍以上の冷却距離が得られる。

第 5 章 500KV 極低温ケーブル終端箱の開発

§ 5.1 梗 概

極低温ケーブルの終端箱は，高電圧下で常温から極低温まで長さ方向に極端に厳しい温度こう配で大電流を通電しなければならない。終端箱を実現させるために解決しなければならない問題として，

- (1) 電氣的に広い温度範囲と厳しい温度こう配で高電圧に耐える絶縁方法
- (2) 熱的に電流リードを含め，外部からの熱の侵入をできるだけ少くして熱的に安定で，しかも冷却するのに経済的な構造が挙げられる。

このような要求を満足させるために電流リードの絶縁方法として真空，ガス，油浸紙の三種類の絶縁方式について検討を進めている。

この中ガス絶縁方式は，極低温と常温を貫通する電流リードの低温部分をガス絶縁するもので，低温窒素ガスの破壊特性を求めその可能性について検討する。一方油浸紙絶縁方式は油浸紙によるコンデンサーコーンにて，電流リードを絶縁するもので，油浸紙の含浸材料として窒素ガスと絶縁油を選び，夫々について耐電圧性の検討を行っている。次に油浸紙絶縁方式で絶縁油含浸構造について154KV級終端箱の開発を進め，冷却実験と耐電圧試験を行い，更にこの終端箱の熱安定性の検討を行うために通電々流を変えてリードの温度分布を測定し理論式を誘導して計算値との比較を行っている。

この結果を踏まえて500KV終端箱を開発し冷却実験と耐電圧試験を行い，更にリードの温度分布と侵入熱の理論計算を行って，この終端箱の電氣的熱的安定性の検討を行っている。

§ 5.2 終端箱設計の基礎的検討

極低温から高電圧下で，電流リードを常温まで引出す方法として次の3種類の絶縁方式が考えられる。

< 5.2.1 > ^{66~69)} 真空絶縁方式

この方式は気中碍子内部の空間を 10^{-6} Torr 程度の高真空に保って極低温と常温との熱絶縁と電気絶縁を兼ねさせるものである。1例を第5.1図に示す。

碍子の内部を高真空状態にし，碍子内面とFRP絶縁筒表面の沿層方向を電気絶縁するとともに絶縁筒内部の液体窒素を熱的にも絶縁する方法である。

真空の絶縁破壊は真空度が 10^{-6} Torr⁷⁰⁾程度になると、残留ガスの電離がほとんど生じないため高い値を示す。しかし、常温と極低温の間を常にこのような高真空に保つのはかなり困難なことで、超高圧ケーブル用終端箱の電気絶縁を真空だけに頼るのは安定性の点で問題が残っている。

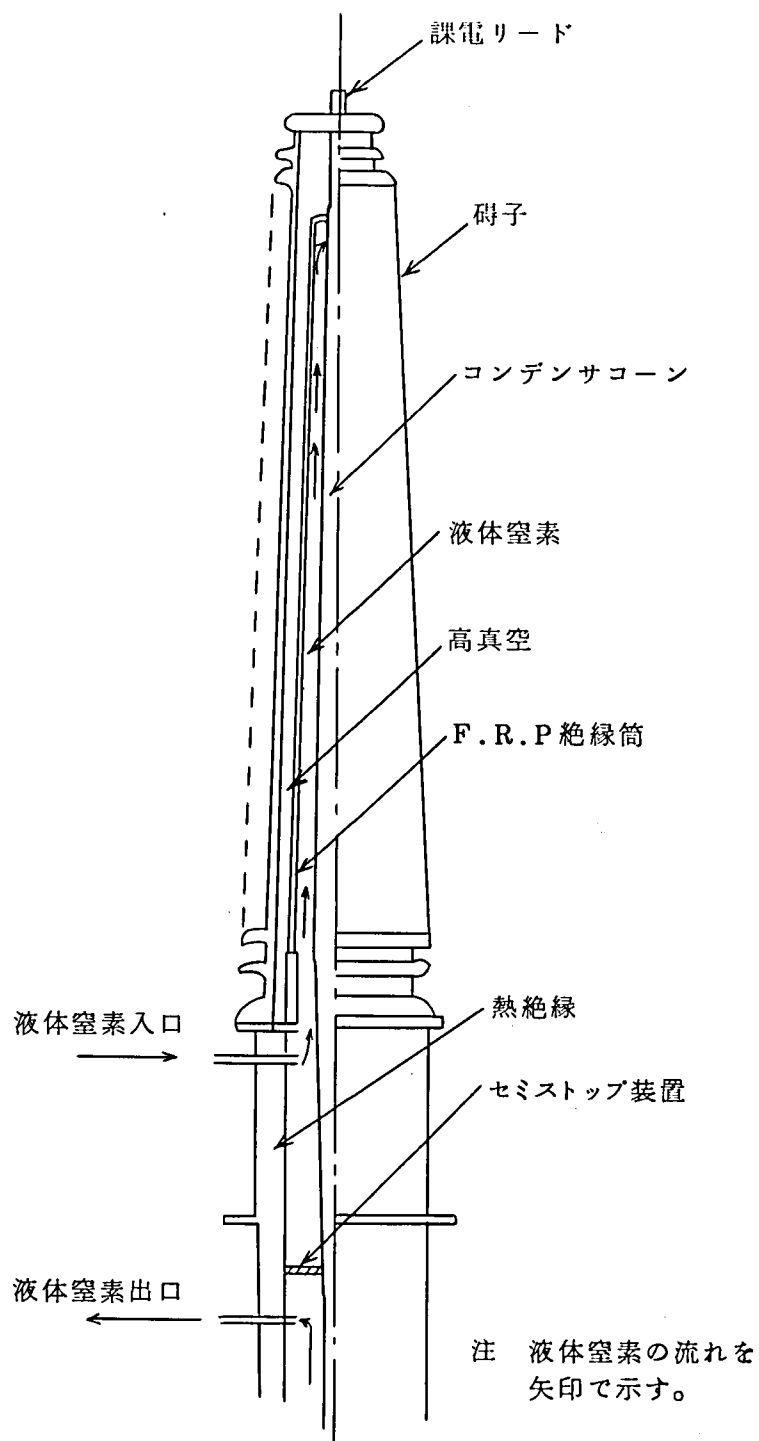
< 5.2.2 > ガス絶縁方式

これは管路気中ケーブルのガス終端箱の応用で、液体窒素中から電流リードを液面上の高圧窒素ガス中に通して常温まで引出しこのガス空間に電気絶縁と熱絶縁を兼ねさせるものである。第5.2図はこの一例で、GE社が極低温ケーブルの試験のために開発したものもこの構造である。⁷¹⁾しかし、ガスが極低温になるため、SF₆などの絶縁耐力の高いガスは凍結して使用することができず、窒素ガスを高い圧力で使用せざるを得ない。この方式を実現するためには常温から極低温までの広い温度範囲における窒素ガスの絶縁耐力を知る必要がある。第5.3図は低温ガスの絶縁破壊特性の測定に使用した試験装置であって液体窒素相の上部の高圧ガス相に同心円筒形電極が設置されている。電極材料は内部電極に鉄を外部電極にステンレス鋼を用い電極表面は5μmの精度に仕上げた。測定結果を第5.4図に示すが低温ガスの破壊値はそれ程高くなく第2章で求めた液体窒素の破壊電圧⁷²⁾の1/7程度になっている。一方、低温窒素ガスの破壊特性は相対密度が変わらなければ常温特性と変わらないとの報告もあ⁷²⁾って、窒素ガスで絶縁するためには高電圧側と接地側との電極間の距離をかなり大きく取る必要がある。更に、中間の液体窒素の液面が電気力線と平行になるので、この部分が電氣的に不安定となり浮遊する塵埃などのために液面がせん絡する恐れもでてくる。しかし、この方式は構造が簡単で電流リードのガス冷却効果^{73, 74)}を利用できる利点も持っている。

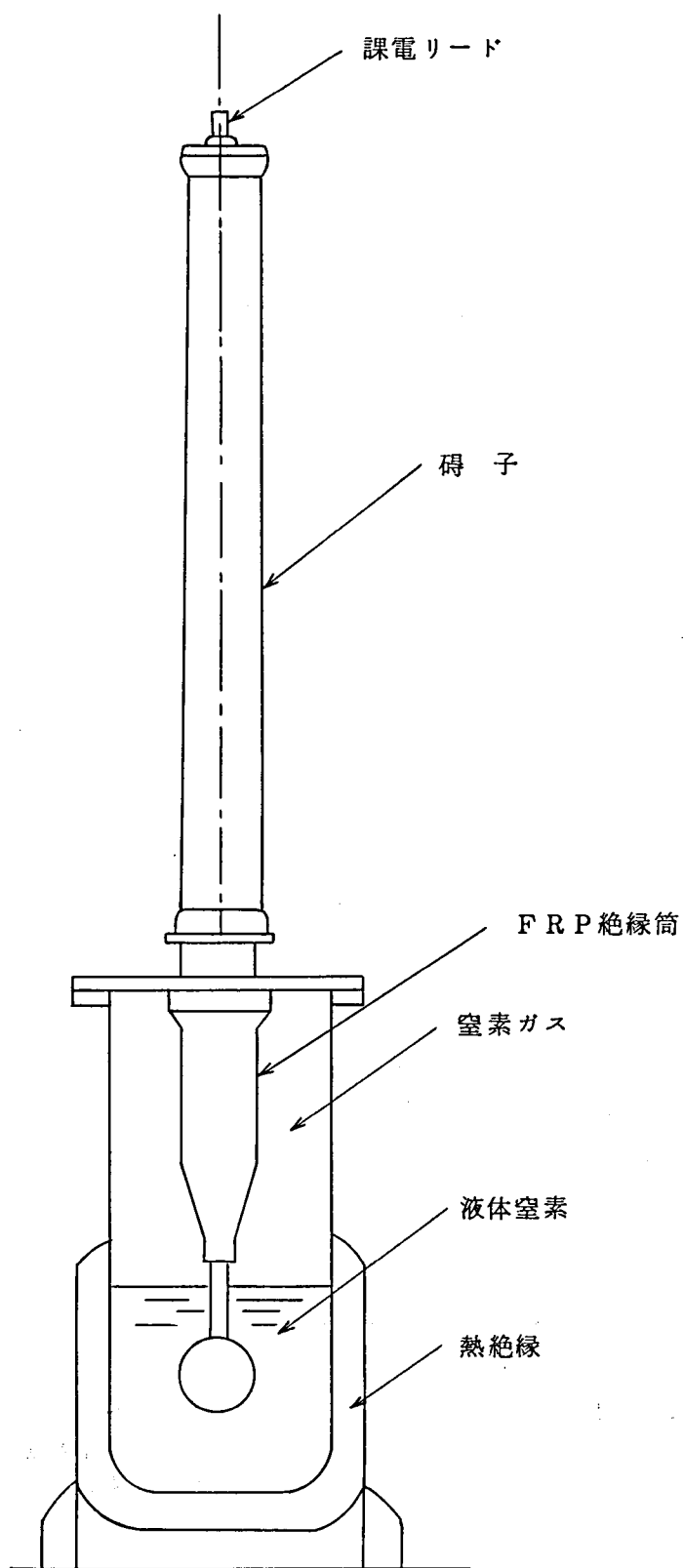
< 5.2.3 > 油浸紙絶縁方式

この方式は、液体窒素温度から常温に高電圧リードを引出す場合の絶縁体として従来からOFケーブルなどの終端箱に使用されている油浸紙を使用するものである。この可能性を検討した実験装置を第5.5図に示す。但しこの段階では図中の絶縁油循環装置はまだ取付けられていない。< 2.3.3 >の結果より液体窒素の絶縁耐力は絶縁油と同等以上であることが知られているので、中間温度領域で耐圧値の低い窒素ガスを除き液体窒素を外周様に充てんする構造にした。中間温度と常温部分の絶縁に使用する油浸紙の含浸材として窒素ガスと合成絶縁油であるDDBについて実験検討した。耐電圧試験の結果を第5.1表に示す。

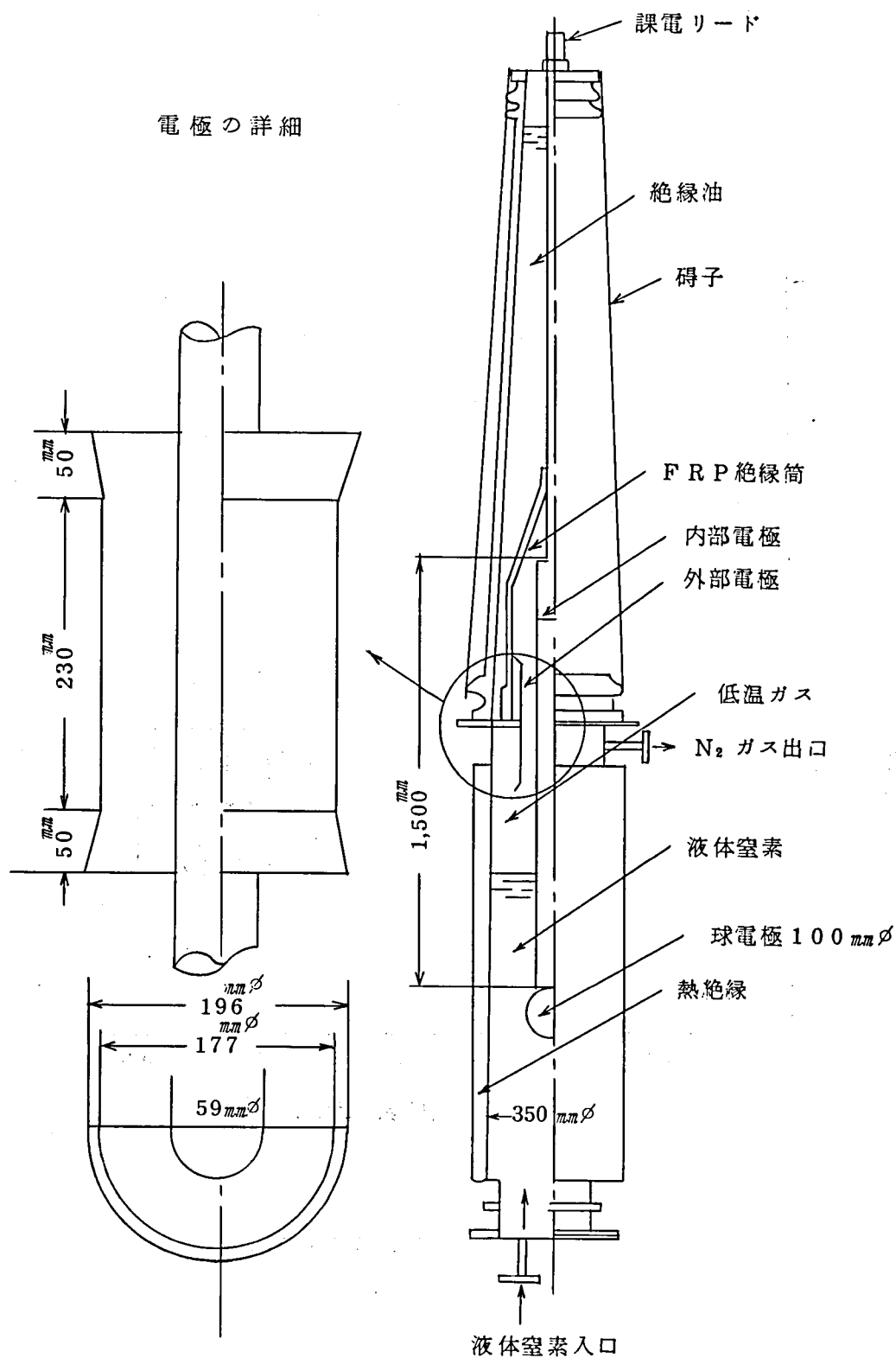
破壊はすべて低温側FRP絶縁筒の内周で、特に絶縁油を充てんしたものは極低温に接する部分が凍結しその部分からスタートしていた。充てん絶縁体として、窒素ガスは沿層破



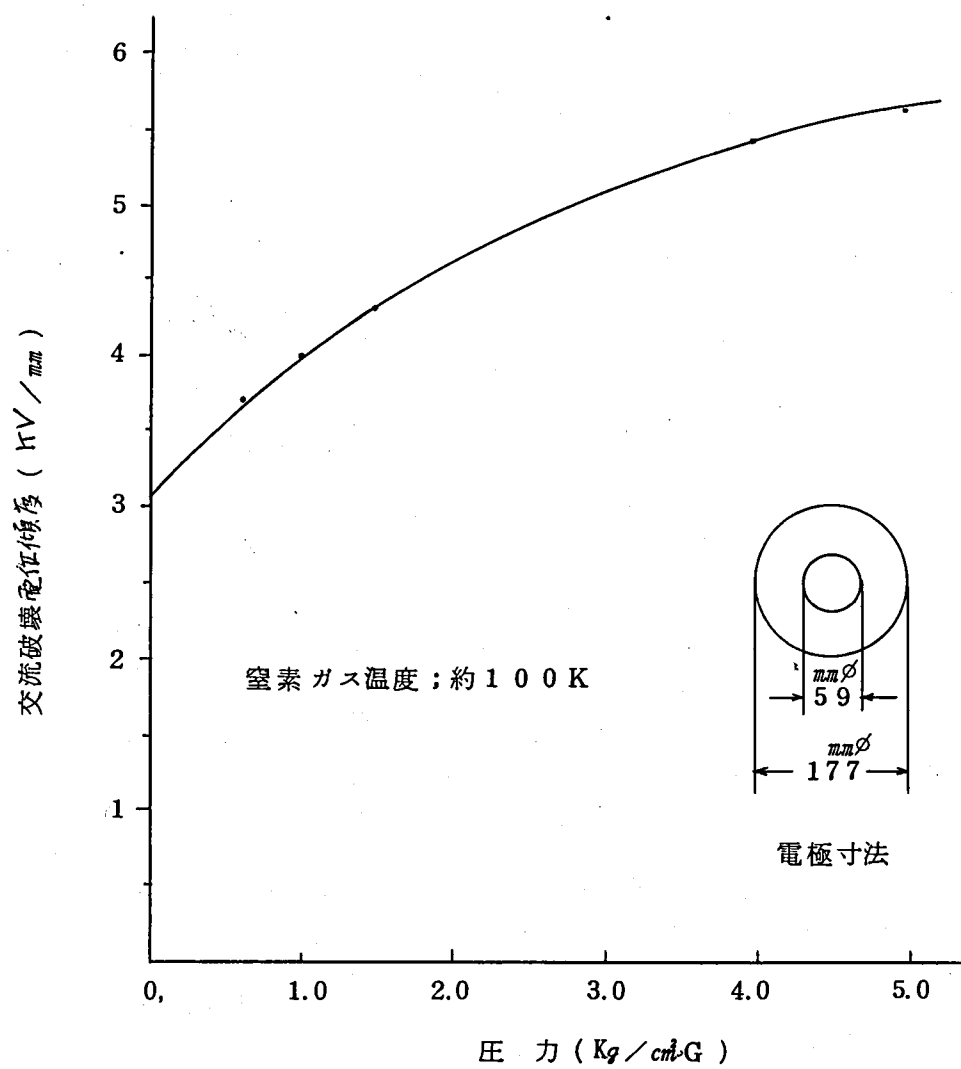
第 5.1 図 高真空絶縁極低温ケーブル終端箱



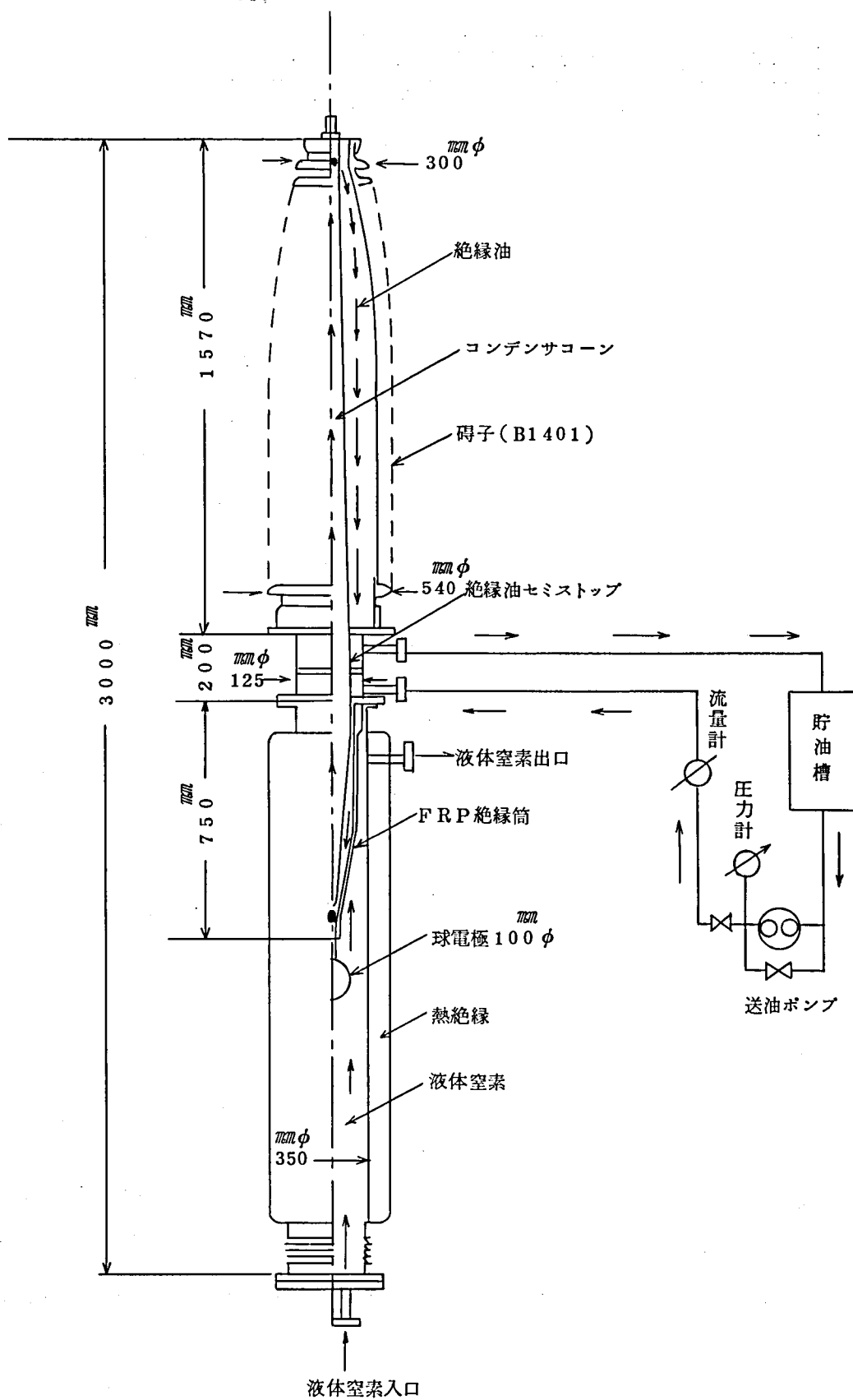
第 5.2 図 ガス絶縁極低温ケーブル終端箱



第 5.3 図 低温窒素ガス耐電圧装置



第 5.4 図 低温窒素ガスの圧力破壊特性



第 5.5 図 極低温ケーブル終端箱基礎実験装置

第 5.1 表 充てん絶縁体別の終端箱の破壊試験

実験 No	充てん絶縁体	圧力(Kg/cm ² ・G)	課電結果	実験結果
1	窒素ガス	5.0	AC 100 KVより 10 KV/min にて昇 圧	200 KVにて低温 側FRP絶縁筒の 内せん
2	DD B 油 (脱気)	3.5	"	270 KVにて低温 側FRP絶縁筒の 内せん
3	"	4.0	"	400 KV昇圧中低 温側FRP絶縁筒 の内せん
4	"	"	Imp(-)450 KV より10 KV/3回 にて昇圧	790 KV2回目で 低温側FRP絶縁 筒の内せん
5	"	6.0	Imp(-)700 KV より10 ^{KV} /3回に て昇圧	810 KV1回目で 低温側FRP絶縁 筒の内せん

破壊電位傾度が低く超高圧ケーブル用ブッシングには使用できない。一方、脱気された絶縁油は凍結してしまうため、油圧の伝達が悪くなって常温の油浸紙で得られる十分な含浸効果が期待できない。しかし、この方式は中間温度領域で絶縁油の凍結を防止することができれば500 KV級としての高い耐電圧性が期待出来る。

§ 5.3 154 KV級極低温ケーブル終端箱の開発

< 5.3.1 > 終端箱の構造

上述のように油浸絶縁方式では充てんされた絶縁油の凍結が起り耐電圧特性が不安定となる。この解決策として既述(第3章)のように充てん絶縁油を送油ポンプで強制的に循環させて低温側ブッシングの凍結を防止する方法を開発した。第5.5図にこの方法による154 KV級終端箱の構造を示す。絶縁油は図に示すように気中がいの基部からブッシング内に入り低温側のFRP絶縁筒の内層に沿って均等に流れ、絶縁油の凍結を防止しながらブッシングの低温端に達する。更にそこから折返してリード内の油通路に入りリードの常温端に達し、常温側碍子の内層に沿って碍子の基部に至り外部に放出される。

< 5.3.2 > 課電試験

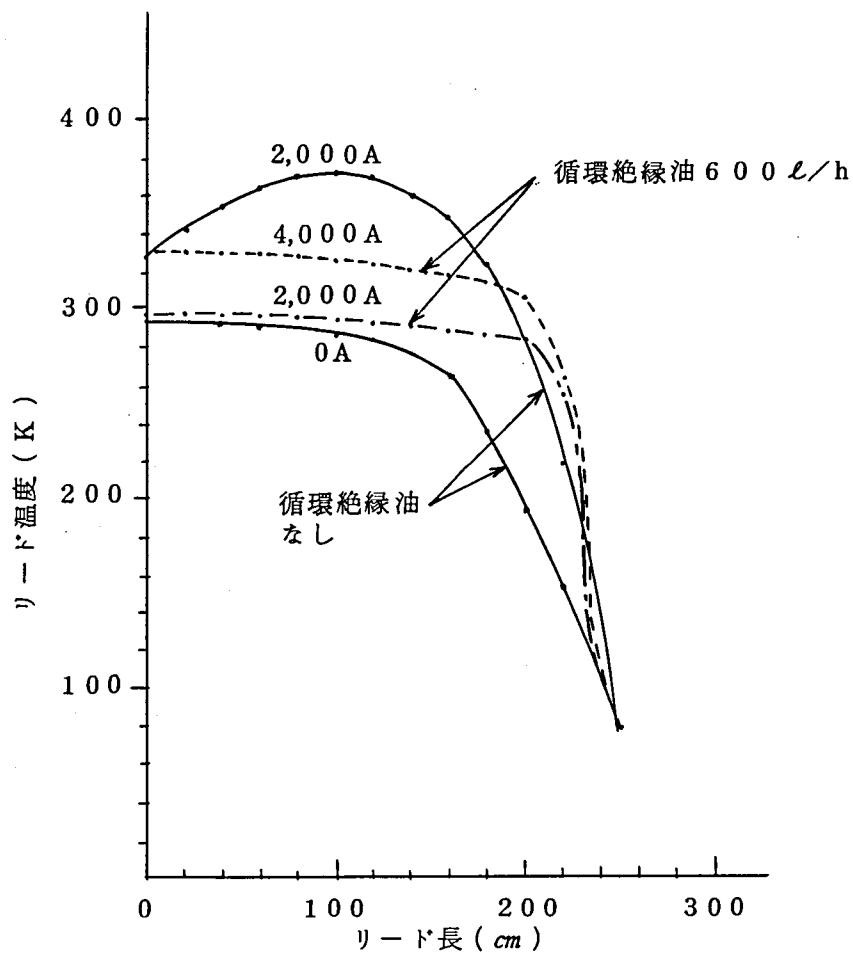
この終端箱の課電試験結果を第 5.2 表に示す。交流，衝撃課電試験とも破壊はすべて碍子の外部せん絡であった。このときの液体窒素の圧力は $4 \text{ Kg/cm}^2 \cdot \text{G}$ であり，液体窒素がブッシング内に漏れてくるのを防止するため，絶縁油の圧力は液体窒素の圧力より $0.5 \sim 1.0 \text{ Kg/cm}^2 \cdot \text{G}$ 程度高めにした。以上の耐電圧試験結果は，従来の常温における 154 KV 級油浸紙絶縁終端箱の破壊値とほぼ同等でありこの方式が超高压ケーブル用終端箱として使用出来る可能性を示している。

< 5.3.3 > 通電試験

通電試験として通電々流を $0, 2,000, 4,000 \text{ A}$ にとり，循環絶縁油量は $0,600 \text{ L/h}$ について電流リードの温度分布を測定した。電流リードは 600 mm の断面積を持ち，長さ 5.25 m でこれを終端箱外部に引出し， $2,000 \text{ mm}$ の銅のブスバーで閉回路とした。このとき温度 80 K で圧力 $4 \text{ Kg/cm}^2 \cdot \text{G}$ の液体窒素を流量 30.0 L/h で極低温容器内に循環しリード線より極低温側に流入する熱を強制的に冷却した。温度分布の実測値を第 5.6 図に示す。絶縁油を循環しない場合，通電々流が 0 A の温度分布は極低温と常温を結ぶ直線にならない。このことは電流リードには軸方向だけの熱量でなく半径方向の熱の流入があることを示している。電流が増加すると常温側の電流リードには温度のピークが現れる。このピーク値は $2,000 \text{ A}$ 以上になると絶縁体の許容温度である 358 K を越える。常温側のピーク値は導体断面積に対する通電々流の制限値を示すもので，リードの長さを一定として断面積を変

第 5.2 表 154 KV 終端箱課電試験結果

課 電 方 法	破 壊 値	液体窒素圧力 ($\text{Kg/cm}^2 \cdot \text{G}$)	絶 縁 油 圧 力 ($\text{Kg/cm}^2 \cdot \text{G}$)
交流電圧 (50 Hz) 200 KV より 10 KV/min にて昇 圧	410 KV 昇圧中気 中側碍子外せん	4.0	5.0
	360 KV 昇圧中気 中側碍子外せん	4.0	4.5
衝撃電圧 (—) (1×40) μS 700 KV より 50 KV/3回 にて 昇圧	$1,100 \text{ KV}$ 2 回目 気中側碍子外せん	4.0	5.0



第 5.6 図 154 kV 終端箱電流リードの
温度分布実測値

化させると当然この値は変化する。第 5.5 図の構造で、絶縁油を循環すると 2,000 A 通電時に生じた常温側電流リードの温度ピークは取去られ 4,000 A でも安定に通電できる。

電流リードが FRP 絶縁筒を貫通した出口の部分を実験の極低温端とすると、極低温端の温度はこの実験の範囲では通電々流および循環油量の影響を受けず 80 K になっており、液体窒素による冷却が十分行われていてリードに接している液体窒素の沸騰が起っていないことを示している。

§ 5.4 電流リードの温度分布および侵入熱の解析

< 5.4.1 > 電流リードの温度分布

解析に先だち次の仮定をする。

- (1) 絶縁油と電流リード間の熱の流れは中空油通路中だけで生じる。
- (2) 電流リードの温度は断面内で一様とする。

従来の電流リードの熱解析では、簡単のために高温端と低温端の温度を固定して解析したものが多い。しかし、実際の終端箱ではこれら高温端と低温端の温度は熱安定性と耐電圧性から見て重要となるので、両端の温度を固定せず計算によって求める事にした。解析を進めるうえで低温端の温度は耐電圧性を考慮して液体窒素が沸騰を起さず、また常温側の電流リードは油浸紙が熱劣化を起さない 358 K 以下を条件とした。

以上の前提の下で電流リードを次の 4 領域に分ける。

I ; リードが直接液体窒素に浸漬される部分

II ; リードの絶縁油循環部分で温度が 300 K 以下になっており、電気抵抗が温度に比例して変化する部分

III ; リードの絶縁油循環部分で温度が 300 K 以上の部分

IV ; 気中ブッシングに接続される外部導体部分

領域 I ではリードは液体窒素に直接接触して冷却される。領域 II では、I と II の境界で導体温度は液体窒素温度とほぼ等温度になり、III の境界で常温に近付くので導体抵抗は温度に比例して変化する。領域 III では常温以上になる。領域 IV は外部導体部分で一般に電流リードの等価断面積は大きくなる。以上を考慮して各領域について次の熱平衡式を得る。

領域 I について、導体抵抗が導体温度に比例し液体窒素温度で常温の $1/10$ になるものとする

$$kA \frac{d^2 T_1}{dx^2} - h_0 P_0 (T_1 - T_0) + 0.86 \frac{I^2 \rho_0}{A} \left\{ 1 + \frac{0.9 (T_1 - T_\infty)}{(T_\infty - T_0)} \right\} = 0 \quad \dots (5.1)$$

領域Ⅱについて $T_2 < 300 \text{ K}$

$$kA \frac{d^2 T_2}{dx^2} - h_1 P_1 (T_2 - T_i) + 0.86 \frac{I^2 \rho_0}{A} \left\{ 1 + \frac{0.9 (T_2 - T_\infty)}{(T_\infty - T_0)} \right\} = 0 \quad \dots (5.2)$$

$$mCi \frac{dT_i}{dx} = h_1 P_1 (T_2 - T_i) \quad \dots (5.3)$$

領域Ⅲについて $T_3 \geq 300 \text{ K}$ で

$$kA \frac{d^2 T_3}{dx^2} - h_1 P_1 (T_3 - T_i) + \frac{0.86}{A} I^2 \rho_0 = 0 \quad \dots (5.4)$$

$$mCi \frac{dT_i}{dx} = h_1 P_1 (T_3 - T_i) \quad \dots (5.5)$$

領域Ⅳについて、外部導体に多導体を使用するものとする

$$NkA' \frac{d^2 T_4}{dx^2} - Nh'P' (T_4 - T_\infty) + 0.86 \frac{I^2 \rho_0}{NA'} = 0 \quad \dots (5.6)$$

但し、 T_0 ；液体窒素温度、 T_{i0} ；外気温度、 $T_1 \sim T_4$ ；各領域におけるリードの温度

T_i ；絶縁油温度 (K)， I ；通電々流 (A)， k ；リードの熱伝導率 (W/cm·K)

ρ_0 ；リードの常温部固有抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)， P_0 ；リードの周長， P_1 ；中空油通路周

長， P' ；外部導体周長 (cm)， N ；外部導体本数， h_0 ；リードと液体窒素間熱伝

達率， h_1 ；外部導体と大気間熱伝達率 (W/cm²·K)， A ；リードの断面積， A' ；外

部導体の断面積 (cm²)， m ；絶縁油循環油量 (g/sec)， C_i ；絶縁油比熱 (J/g·K)

次に

$$\frac{T_0 - T_\infty}{T_\infty} = \theta_0, \quad \frac{T_1 - T_\infty}{T_\infty} = \theta_1, \quad \frac{T_2 - T_\infty}{T_\infty} = \theta_2,$$

$$\frac{T_3 - T_\infty}{T_\infty} = \theta_3, \quad \frac{T_4 - T_\infty}{T_\infty} = \theta_4, \quad \frac{T_i - T_\infty}{T_\infty} = \theta_i$$

$$X = \sqrt{\frac{P_0}{kA}} x, \quad \alpha = \frac{0.86 \rho_0}{AT_\infty P_0}, \quad \beta = \frac{P_1}{mCi} \sqrt{\frac{kA}{P_0}}, \quad r = \frac{0.86 \rho_0 A}{N^2 P_0 T_\infty A'^2}$$

とおき (5.2)～(5.4) から T_i を消去すると

$$\frac{d^2 \theta_1}{dx^2} - \left(h_0 + \frac{0.9 \alpha I^2}{\theta_0} \right) \theta_1 + h_0 \theta_0 + \alpha I^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^3 \theta_2}{dx^3} + h_1 \beta \frac{d^2 \theta_2}{dx^2} - \left(\frac{h_1 P_1}{P_0} + \frac{0.9 \alpha I^2}{\theta_0} \right) \frac{d\theta_2}{dx} \\ - \frac{0.9 \alpha \beta h_1 \theta_2 I^2}{\theta_0} + h_1 \alpha \beta I^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (5.8) \end{aligned}$$

$$\frac{d^3 \theta_3}{dx^3} + h_1 \beta \frac{d^2 \theta_3}{dx^2} - h_1 \frac{P_1}{P_0} \frac{d\theta_3}{dx} + h_1 \alpha \beta I^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (5.9)$$

$$\frac{d^2 \theta_4}{dx^2} - \frac{A P' h' \theta_4}{A' P_0} + \gamma I^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (5.10)$$

以上の (5.7) ~ (5.10) 式を I, m の初期値を与え、次の境界条件で解くと、 $\theta_1 \sim \theta_4$ が求められる。

境界条件⁷⁵⁾

(1) $X = 0$ で

$$\theta_1 = \theta_2, \theta_1' = \theta_2', \theta_1'' = \theta_2'' + h_0 (\theta_1 - \theta_0) - \frac{h_1 P_1}{P_0} (\theta_1 - \theta_{i0})$$

ここに

$$\theta_{i0} = \frac{T_{i0} - T_{\infty}}{T_{\infty}} \quad (T_{i0}; \text{絶縁油リード入口温度})$$

(2) $T_2 = 300 \text{ K}$ になる $X = L_1$ で

$$\theta_2 = \theta_3, \theta_2' = \theta_3', \theta_2'' = \theta_3'' + \frac{0.9 \alpha I^2 \theta_2}{\theta_0}$$

(3) $X = L_2$ で外部導体と接続するものとする

$$\theta_3 = \theta_4, \theta_3' = N \theta_4'$$

これらの関係より $\theta_1 \sim \theta_4$ は下記のようになる。

$$\theta_1 = B_1 e^{\sqrt{D_0} X} + \frac{\alpha I^2 + h_0 \theta_0}{D_0} \quad \dots\dots\dots (5.11)$$

$$\theta_2 = B_2 e^{s_1 X} + B_3 e^{s_2 X} + B_4 e^{s_3 X} + \frac{\theta_0}{0.9} \quad \dots\dots\dots (5.12)$$

$$\theta_3 = B_5 + B_6 e^{D_1 X} + B_7 e^{D_2 X} + \alpha \beta \frac{P_0}{P_1} I^2 X \quad \dots\dots\dots (5.13)$$

$$\theta_4 = B_8 e^{-\sqrt{P' A h' / P_0 A'} X} + \gamma \frac{P_0 A' I^2}{h' P' A} \quad \dots\dots\dots (5.14)$$

ここに、 $S_1, S_2, S_3, D_0, D_1, D_2$ は次の3次および2次方程式の実数根である。

$$Y^3 + h_1 \beta Y^2 - \left(h_1 \frac{P_1}{P_0} + \frac{0.9 \alpha I^2}{\theta_0} \right) Y - \frac{0.9 \alpha \beta h_1 I^2}{\theta_0} = 0 \quad \dots\dots\dots (5.15)$$

$$D_0^2 - \left(h_0 + \frac{0.9 \alpha I^2}{\theta_0} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (5.16)$$

$$D^2 + h_1 \beta D - \frac{h_1 P_1}{P_0} = 0 \quad \dots\dots\dots (5.17)$$

< 5.4.2 > 絶縁油の温度分布

(5.2) ~ (5.5) 式より絶縁油の温度分布 θ_i を求める。

領域Ⅱでは

$$\begin{aligned} \theta_i = h_1 \beta & \left(\frac{B_2}{S_1 + h_2 \beta} e^{S_1 X} + \frac{B_3}{S_2 + h_1 \beta} e^{S_2 X} \right. \\ & \left. + \frac{B_4}{S_3 + h_1 \beta} e^{S_3 X} + \frac{\theta_0}{0.9 h_1 \beta} \right) + C_1 e^{-h_1 \beta X} \quad \dots\dots\dots (5.18) \end{aligned}$$

ここに

$$C_1 = \theta_{i0} - h_1 \beta \left(\frac{B_2}{S_1 + h_1 \beta} + \frac{B_3}{S_2 + h_1 \beta} + \frac{B_4}{S_3 + h_1 \beta} + \frac{\theta_0}{0.9 h_1 \beta} \right) \quad \dots\dots\dots (5.19)$$

$$\theta_{i0} = \frac{T_{i0} - T_{\infty}}{T_{\infty}}, \quad T_{i0} ; \text{絶縁油入口温度 (K)}$$

領域Ⅲでは

$$\begin{aligned} \theta_i = h_1 \beta & \left\{ \frac{B_5}{h_1 \beta} + \frac{B_6}{D_1 + h_1 \beta} e^{D_1 X} + \frac{B_7}{D_2 + h_1 \beta} e^{D_2 X} \right. \\ & \left. + \frac{\alpha \beta I^2 P_0}{h_1 \beta P_1} \left(X - \frac{1}{h_1 \beta} \right) \right\} + C_2 e^{-h_1 \beta X} \quad \dots\dots\dots (5.20) \end{aligned}$$

ここに

$$\begin{aligned} C_2 = \theta_{i1} e^{h_1 \beta X_1} - h_1 \beta e^{h_1 \beta X_1} & \left\{ \frac{B_5}{h_1 \beta} + \frac{B_6}{D_1 + h_1 \beta} e^{D_1 X_1} + \frac{B_7}{D_2 + h_1 \beta} e^{D_2 X_1} \right. \\ & \left. + \frac{\alpha \beta P_0 I^2}{h_1 \beta P_1} \left(X - \frac{1}{h_1 \beta} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (5.21) \end{aligned}$$

$$\theta_{i1} = \frac{T_{ix1} - T_{\infty}}{T_{\infty}}$$

T_{ix1} ; $T_s = 300 \text{ K}$ になる $X = X_1$ における絶縁油温度

< 5.4.3 > 侵入熱

液体窒素への侵入熱は、リードからの侵入熱 Q_1 と FRP 絶縁筒を介して絶縁油から液体窒素へ侵入する熱 Q_2 とが考えられる。これらはそれぞれ次式で与えられる。

$$Q_1 = Ak \left(\frac{d\theta_z}{dx} \right)_{x=0} \sqrt{\frac{P_o}{kA}} T_{\infty} \dots\dots\dots (5.22)$$

FRP 絶縁筒を円筒と円錐で近似して

$$Q_2 = (K_1 AF_1 + K_2 AF_2) (T_{\infty} - T_o) \dots\dots\dots (5.23)$$

$$\frac{1}{K_1} = \frac{1}{hF_1} + \frac{tF}{kF} + \frac{1}{hF} \dots\dots\dots (5.24)$$

$$\frac{1}{K_2} = \frac{1}{hF_2} + \frac{tF}{kF} + \frac{1}{hF} \dots\dots\dots (5.25)$$

ここに、 AF_1 ; 円筒部表面積 (cm^2) , AF_2 ; 円錐部表面積 (cm^2) , hF_1 , hF_2 ; それぞれ円筒部および円錐部における絶縁油と FRP 絶縁筒との熱伝達率 ($W/cm^2 K$) , kF ; FRP 絶縁筒の熱伝達率 ($W/cm K$) , tF : FRP 絶縁筒肉厚 (cm) , hF ; FRP 絶縁筒と液体窒素との熱伝達率 ($W/cm^2 K$)

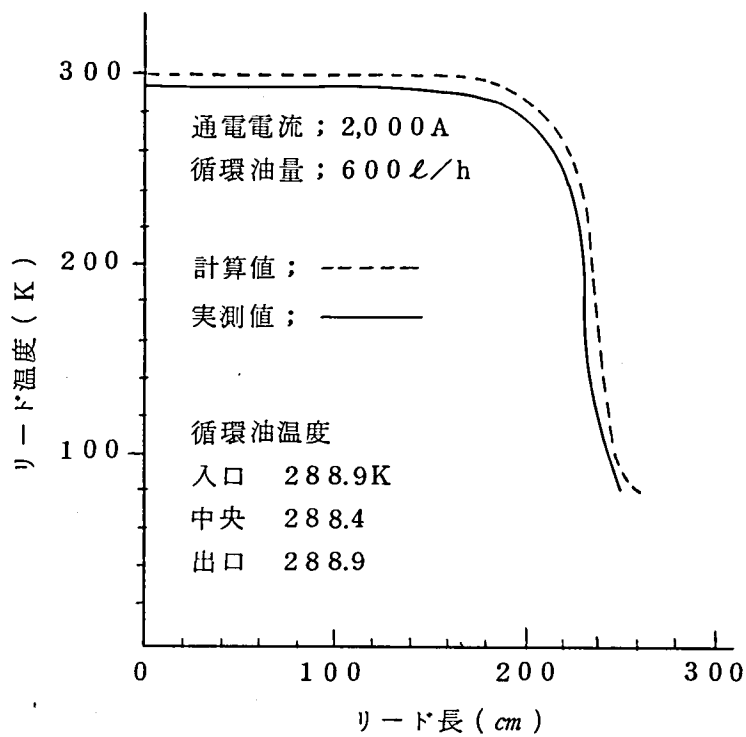
次に電流リードの油通路入口における絶縁油の温度 T_{io} は

$$T_{io} = T_{\infty} - \frac{Q_2}{mC_i} \dots\dots\dots (5.26)$$

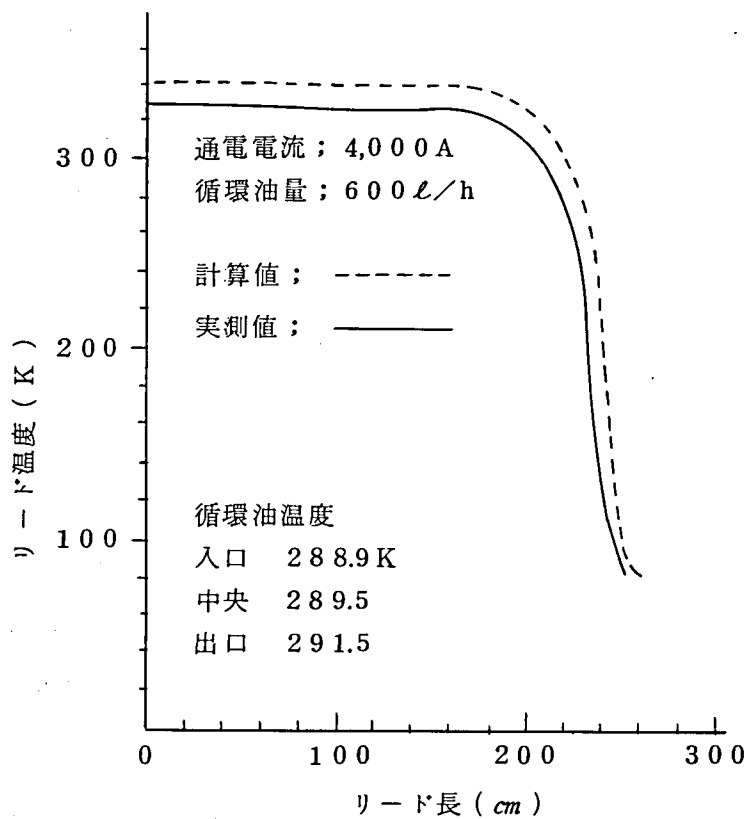
で与えられる。

< 5.4.4 > 温度分布の計算値と実測値との比較

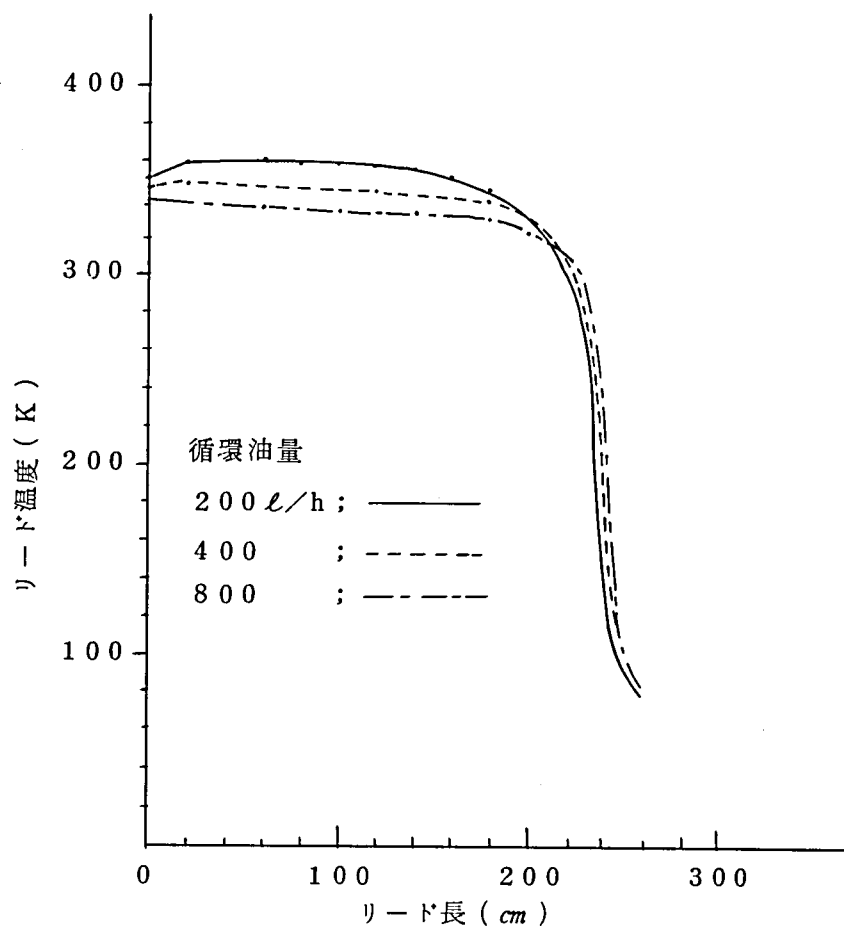
循環絶縁油量 600 l/h で通電々流 $2,000 \text{ A}$ および $4,000 \text{ A}$ の場合のリードの温度分布の計算値を実測値と比較して第 5.7 図, 5.8 図に示す。実測値と計算値とは比較的よく一致しているが計算値の方が稍大きく成っている。これは、計算値では液体窒素で直接強制冷却される領域 I と、常温の絶縁油の循環を受ける領域 II が接しているものとして取扱ったため、実際のリードでは I と II の境界の間に FRP 絶縁筒を貫通する部分がありこれが温度の緩衝帯になっている。



第 5.7 図 2,000 A 通電, 600 l/h 循環時の
 154 kV 電流リードの温度分布



第 5.8 図 4,000 A 通電, 600 l/h 循環時の
 154 kV 電流リードの温度分布



第 5.9 図 4,000 A 通電、循環油量変化の場合
154KV 電流リードの温度分布

< 5.4.5 > 循環油量の影響

第 5.9 図は 4,000 A 通電時に循環油量を変化させて求めた温度分布の計算例である。常温側である領域Ⅲの温度は循環油量の増加と共に低く、低温側である領域Ⅱの温度は逆に高くなり、循環油によって常温部は冷却され、低温部は加熱されていることを示している。しかし上述の極低温端の温度は循環油量の影響を受けておらずほとんど液体窒素の温度まで冷却されている。

< 5.4.6 > 通電々流の影響

通電々流のリード温度に与える影響は 600 ℓ/h の循環油量の場合に、第 5.7., 5.8 図に示すように、通電々流が増加すると常温部分の領域Ⅲの温度は上昇するが低温側の温度はほとんど変わらず、特に< 5.4.4 >で述べたように極低温端の温度は過冷却の液体窒素の温度近くまで冷却されている。このことは耐電圧性の点から見て特に重要であって、極低温端に接する液体窒素が沸騰していない事を示している。通電々流を決定する条件は、常温部の温度が油浸紙の許容温度の 358 K 以下であり、極低温端の温度が液体窒素の沸騰を起さない温度になっていることである。

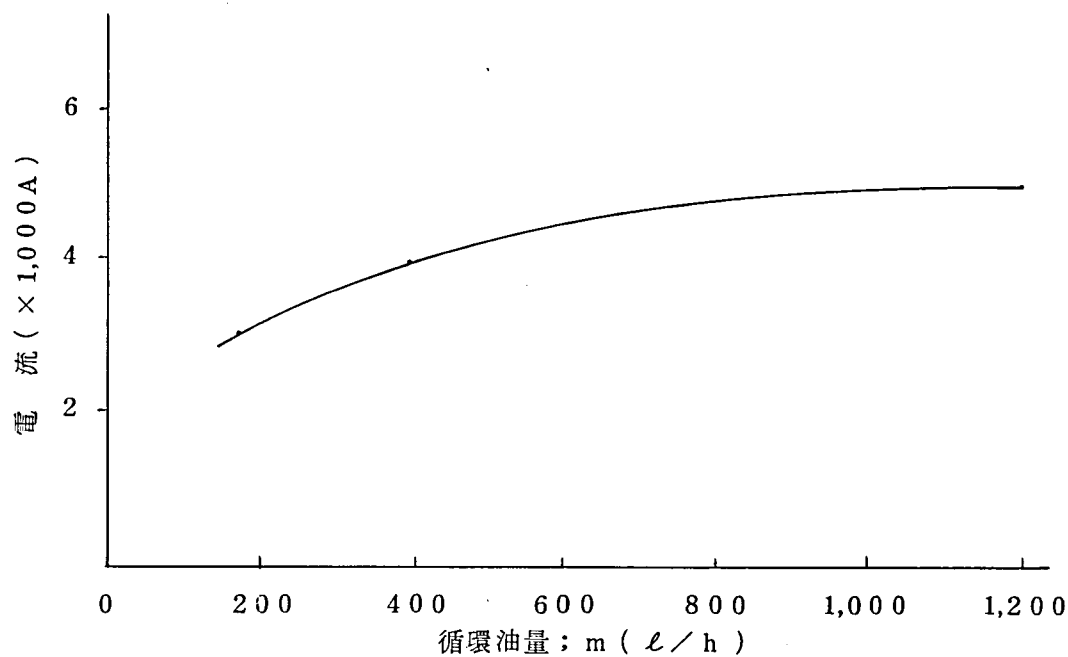
これ等の条件を検討するために (5.11) ~ (5.13) 式を用い通電々流および循環油量を変化させて各部の温度を求めた。その結果、ある循環油量について通電々流を制限するのは常温部の温度制限で、これを 358 K 以下にする電流であれば、極低温部の温度は十分液体窒素の過冷却温度になっていることがわかる。このようにして求めた通電々流と循環油量の関係を第 5.10 図に示す。

< 5.4.7 > 侵入熱と循環油温度分布

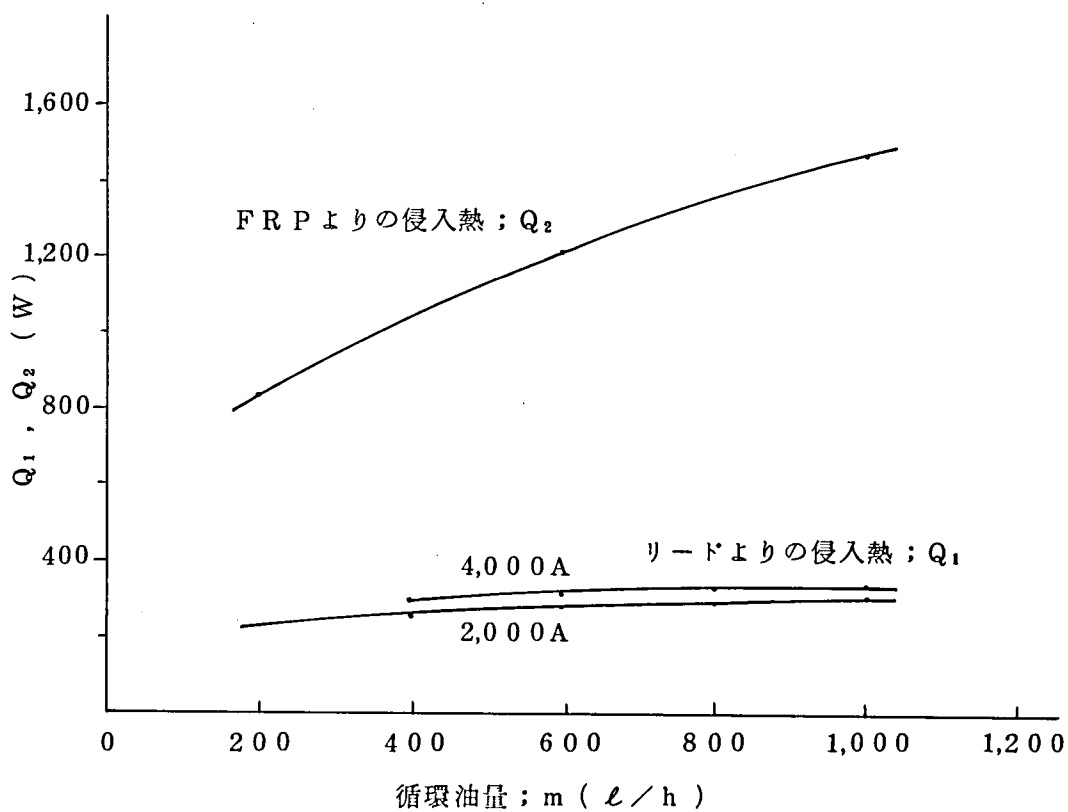
リードより液体窒素への侵入熱 Q_1 は、循環油量と通電々流の影響を受けて変り、循環油量と電流の増加と共に緩やかに増加する。一方 FRP 絶縁筒を介して循環絶縁油から液体窒素への侵入熱 Q_2 は、循環油量の増加と共に大幅に増加する。これ等の関係を第 5.11 図に示す。

循環絶縁油は、常温よりリードの絶縁油入口に達するまでに冷却され、リードの中空油通路内で加熱されて排出される。その温度変化は循環油量が少なく電流が大きくなる程大きくなるが、安定に通電できる範囲ではわずかである。一例として 600 ℓ/h の流量での循環絶縁油の温度変化計算値を第 5.7 図、第 5.8 図に示した。

なお上述の計算に使用した諸常数は $\rho_o = 1.7 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$, $k = 3.95 \text{ W/cm K}$, $h_o = 0.58 \text{ W/cm}^2 \text{ K}$ ⁷⁶⁾, $h' = 8.14 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2 \text{ K}$ ⁷⁷⁾ で hF は h_o と等しいものとした。一方、 h_1 ⁷⁸⁾ および hF_1 , hF_2 は層流の場合のパイプ内熱伝達として次式より求め第 5.3 表に示した。



第 5.10 図 154 kV 終端箱の通電可能最大電流と循環油量



第 5.11 図 154 kV 終端箱の侵入熱，通電電流および循環油量

第 5.3 表 循環油量と熱伝達率

(a) 1 5 4 KV 終端箱

循環油量 $m \text{ } \ell/h$	2 0 0	4 0 0	6 0 0	8 0 0	1,0 0 0	1,2 0 0
$h_i 10^{-4} \times W/cm^2 K$	1 4 7.6	1 8 6.1	2 1 2.8	2 3 4.1	2 5 2.3	2 6 8.2
hF_1 "	1 1.0	1 4.0	1 5.9	1 7.6	1 8.8	2 0.1
hF_2 "	1 5.4	1 9.3	2 2.1	2 4.3	2 6.3	2 7.9

(b) 5 0 0 KV 終端箱

循環油量 $m \text{ } \ell/h$	2 0 0	4 0 0	6 0 0	8 0 0	1,0 0 0	1,2 0 0
$h_i 10^{-4} \times W/cm^2 K$	4 5.9	5 7.9	6 6.3	7 2.9	7 8.5	8 3.5
hF_1 "	4.2	4.9	6.2	6.7	7.2	7.7
hF_2 "	6.7	7.8	9.8	1 0.8	1 1.6	1 2.3

(注) 熱伝達率記号

リード絶縁油間 ; h_i

F R P 絶縁筒 (円筒部) 絶縁油間 ; hF_1

" (円錐部) " ; hF_2

$$\frac{hD}{\lambda_i} = 1.75 \left(\frac{mCi}{\lambda_i Li} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (5.27)$$

ここに, λ_i ; 絶縁油熱伝導率 ($W/cm K$), Li ; 油通路長 (cm), D ; 油通路内径 (cm)

§ 5.5 5 0 0 KV 極低温ケーブル終端箱の開発^{79~81)}

< 5.5.1 > 終端箱の構造及び絶縁設計

基礎検討および 1 5 4 KV 級終端箱の試験結果を基にして 5 0 0 KV 級の終端箱を開発した。

その構造は第 5.1 2 , 5.1 3 図に示すように 1 5 4 KV 級終端箱を拡大したものである。

液体窒素の絶縁破壊特性が第 2.5 , 2.6 図のように絶縁油と同程度に秀れているので低温圧力容器の内径は 1,2 0 0 mm ϕ とした。この容器はステンレス鋼製で 1 5 $Kg/cm^2 \cdot G$ の内圧に耐えるようになっている。断熱層としては 1 5 4 KV 第 2 次モデルケーブルと同様に 0.1 5 mm のアルミ蒸着マイラーテープとグラステープを組合せ、これを 4 0 層積層して 1 0⁻⁴ Torr

まで真空引したもので安定した断熱性能が得られている。

液体窒素から常温への電流リードには油入ブッシングを用いたがこれは従来のコンデンサー型壁抜套管とほぼ同様に設計する事が出来る。⁸²⁾ 低温側コンデンサー電極は大地との間の漂遊容量が大きくこれを無視する事が出来ない。それ故これを考慮して第 5.1 4 図のような電極配置を考えると低温側のコンデンサーの電極長は次式で与えられる。

$$l_n = l_{n-1} \frac{C_n - nk_n}{C_{n+1} - nk_n} + f_e \frac{C_{n+1} - C_n + nk_n - (Ne - n) P_n}{C_{n+1} - nk_n} \dots\dots\dots (5.28)$$

ここに、 C_n ; 電極間、 k_n ; n 電極と導体間、 P_n ; n 電極と大地間の単位長当りの静電容量 ($\mu F/cm$)、 f_e ; 隣接電極間外部沿面距離 (cm)、 l_n ; n 電極の長さ (cm)
 Ne ; 電極総数

なお常温側の電極長は (5.28) 式の P_n を 0 と置いて求める事が出来る。

(5.28) 式から各層の電極長は、電極間の絶縁厚を一定として、 $n=0$ の l_0 および f_e の値を定めると順次求める事が出来る。

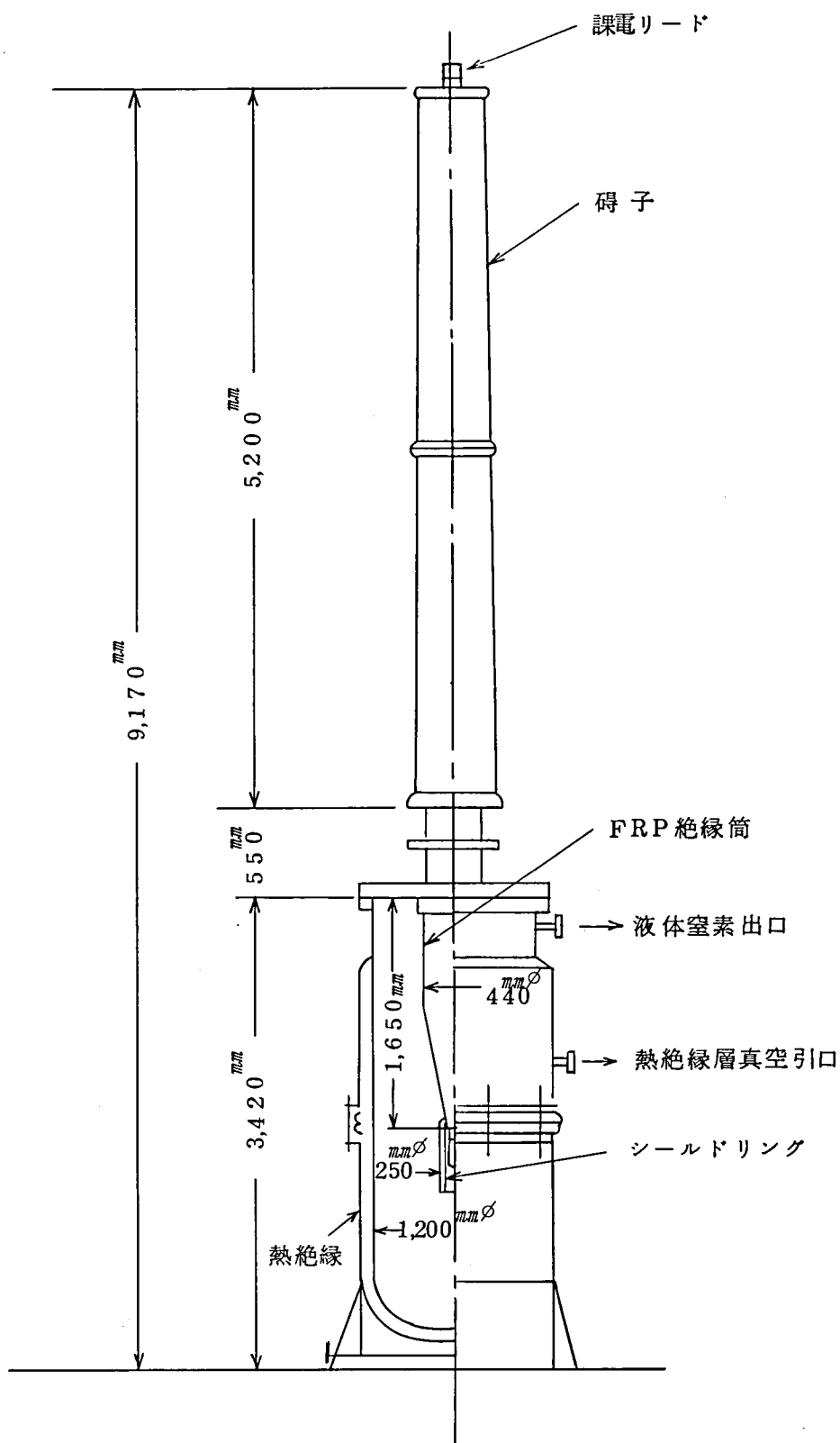
500 KV用のコンデンサーブッシングの電極総数 Ne は 60 とし、低温側の設計沿面電位係数は交流電圧で 0.75 KV/mm 、衝撃電圧で 2.5 KV/mm とした。これ等の値は従来の油入コンデンサーブッシングの設計に用いられている値とほぼ同じである。

< 5.5.2 > 課電試験

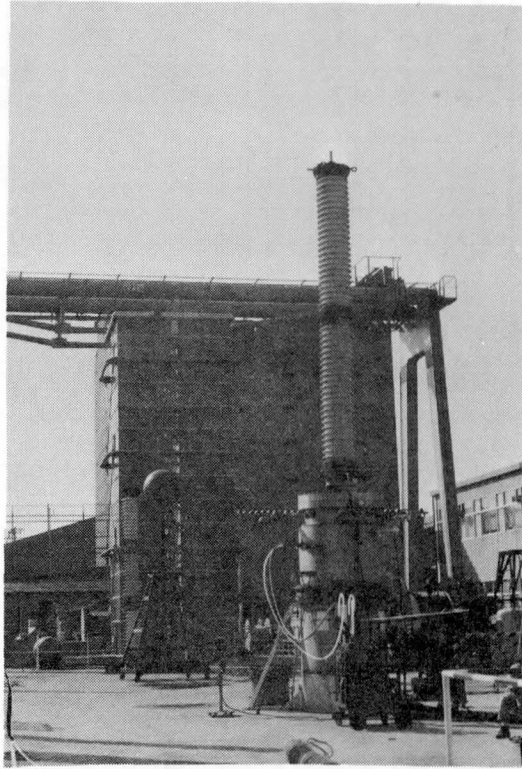
試験に先立ち、極低温容器は 10^{-1} Torr まで真空引し空気の混入を防止するため窒素ガスを高めに充てんし、その後液体窒素タンクの自圧を利用して容器内に低温ガスを流し乍ら 15 h かけて予冷した。液体窒素が圧力容器の上端から吐出するのを確認してから、第 3 章の液体窒素冷却ユニットを働かせて 400 l/h の流量で容器内に 79 K の液体窒素を $7 \sim 8 \text{ Kg/cm}^2 \cdot \text{G}$ の圧力で加圧循環させた。なお、液体窒素中の塵埃を除くため、液体窒素の循環回路には $10 \mu m$ メッシュのフィルタをそう入した。

電流リード低温帯のシールドとして、外径 250 mm 、長さ 300 mm の円筒状のアルミ製電極を用い、これに 0.1 mm 厚のポリエチレン紙を 15 mm 厚さに巻いて補強絶縁した。実際のケーブルではこのアルミ電極の内部に可とうより線を収容する構造が考えられる。

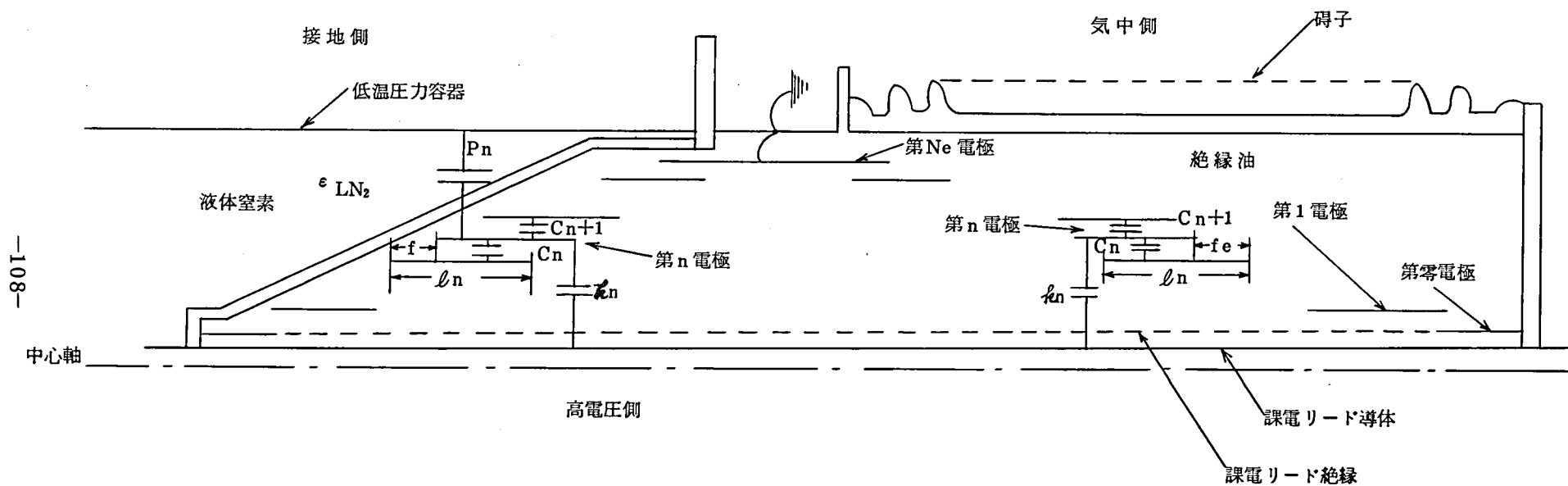
電圧の印加は交流電圧で 50 KV/min 、衝撃電圧では 50 KV / 3 回のステップで上昇させた。なお交流の場合には 500 KV 及び 650 KV で 10 分間同一の電圧を維持した。試験結果を第 5.4 表に示すが 500 KV 級の終端箱としてほぼ満足出来る特性値が得られた。



第 5.1 2 図 500kV 極低温ケーブル終端箱



第 5.13 図 500KV 極低温抵抗ケーブル
終端箱外観



第 5.1 4 図 コンデンサーブッシングの電極配置

第 5.4 表 500 KV 終端箱課電試験結果

	耐 電 圧 値	液体窒素圧力 Kg/cm^2G
交流電圧	500 KV, 650 KV 10 min OK	7.5
衝撃電圧	1,850 KV 3回 OK	7.5

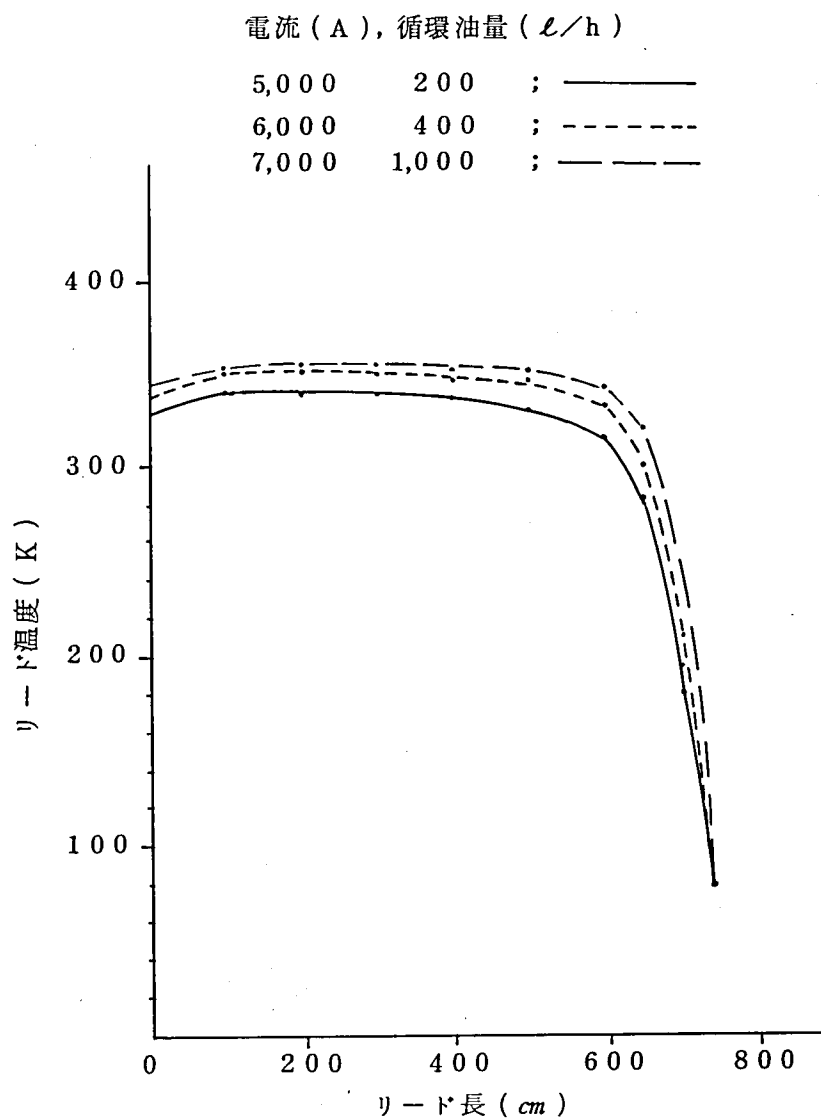
第 5.5 表 500 KV 終端箱各部温度および侵入熱

電 流 A	5,000	6,000	7,000
循 環 油 量 l/h	200	400	1,000
高 温 端 温 度 K	326.3	335.4	341.8
極 低 温 端 温 度 K	80.3	80.4	80.4
循 環 油 温 度 K			
リード入口	285.7	291.0	294.4
中央	288.4	293.7	296.6
出口	296.0	299.2	299.7
侵 入 熱 W			
Q_1 (リードより)	415	486	572
Q_2 (FRPより)	1,426	1,779	2,498

< 5.5.3 > 熱安定性の検討

500 KV 終端箱の熱安定性を既述 (§ 5.4) の方法で検討した。この終端箱には断面積 $2,000\text{ mm}^2$ 、長さ 7.4 m の電流リードが使用されている。なお、計算にあたり熱伝達率は h_1 、 hF_1 、 hF_2 、(第 5.3 表参照) 以外は § 5.4 と同一の値を採用し、外部導体には $2,000\text{ mm}^2$ の銅のブスバーを 2 本接続する構造を想定した。温度分布を (5.11) ~ (5.13) 式より求め第 5.15 図に示したが 154 KV のときと類似の曲線が得られた。5,000 A、6,000 A および 7,000 A 通電時における最低必要循環油量、リードの両端温度、循環絶縁油温度および侵入熱 Q_1 、 Q_2 を求め第 5.5 表に示した。

154 KV の場合と同様に、ある循環油量に関して安定に通電出来る電流は常温部の温度を 358 K 以下にすることから決定される。その場合に、極低温端の温度はほとんど過冷却の液体窒素温度まで冷却されるので、この部分で液体窒素の沸騰が起らず耐電圧の点でも安定していることがわかる。一方、第 5.5 表から、循環絶縁油の温度変化はそれほど小さく



第 5.15 図 500 kV 終端箱の温度分布

その温度制御は容易と考えられる。

次にこの終端箱の熱損失について検討する。送電容量 $6,000 \text{ MVA/cct}$ の極低温ケーブルの熱損失は約 $300 \text{ W/m} \cdot 3\phi$ であり一方 $6,000 \text{ MVA}$ で $7,000 \text{ A}$ 通電時のこの終端箱の熱損失は第 5.5 表より $3,070 \text{ W}/\phi$ であって、ケーブルの熱損失と比較して許容できる範囲にある。しかしこの終端箱は耐電圧性能の向上に重点を置いて開発されており、既述 (§ 5.2) の他の方式と比較してかなり熱損失が大きい。特に Q_2 が Q_1 の約 4 倍にもなるため、 Q_2 を減少させて更に効率を上げるには FRP 絶縁筒の断熱が必要になる。一例として、 154 KV 級終端箱の場合に FRP 絶縁筒の外側にクラフト紙の積層断熱を 50 mm 程度行っても、絶縁筒の液体窒素中での沿面破壊強度が低下しないことが確認されており、この場合の Q_2 は 600 l/h の循環油量で約 50% 減少することが計算により求められている。

§ 5.6 要 約

熱的にも電氣的にも苛酷な条件で使用される極低温ケーブル終端箱に関する基礎実験と検討を行い、 154 KV 及び 500 KV 終端箱の開発を行い、冷却実験と通電及び課電試験を行い下記の結論を得た。

- (1) 電流リードの窒素ガス絶縁方式は、低温窒素ガスの破壊値が大きいために 500 KV 級終端箱には採用出来なかった。
- (2) 油浸紙絶縁方式では、油浸紙によるコンデンサーコーンの含浸材として窒素ガスは沿層方向の破壊電位強度が低く、一方絶縁油は凍結して十分な耐電圧性を得る事が出来なかった。
- (3) 油浸紙絶縁方式で、絶縁油をプッシングに強制循環し、低温部の絶縁油の凍結を防止して耐電圧性を向上し、常温部のリードの通電時の温度上昇を抑制する方法を考案した。これにより 154 KV 級 $1,000 \text{ MVA}$ の終端箱を開発し十分な耐電圧値を得る事が出来た。一方循環油量と通電々流をパラメータにとった温度分布の理論計算を行い、実測値との一致を見た。
- (4) 以上の結果を用いて 500 KV 終端箱を開発し 500 KV 級として十分な耐電圧値を得る事が出来た。一方理論計算式により循環油量と通電々流をパラメータにとった場合の温度分布と侵入熱を求めこの終端箱が熱的にも安定である事を確認した。

第 6 章 500KV 極低温モデルケーブルの開発

§ 6.1 梗 概

本章ではこれまでの実験と検討結果にもとづいて実用線路に近い規模の液体窒素冷却 500KV, 5,000MVA 級極低温モデルケーブルの開発を行っている。

このモデルケーブルは 154KV 第 2 次モデルケーブルを拡大したものである。

すなわち、低温圧力容器として 20m の断熱管路の両端に夫々気中終端箱と液中終端箱を取り付けた構造で、熱絶縁には施工の容易さと経済性を考慮してフォーム断熱を採用している。ケーブルコアは 154KV 第 2 次モデルケーブルのコアと同様に、冷媒流路を持ち表皮効果と熱収縮の対策を施したアルミより線上にクラフト紙絶縁を行うもので、設計は第 4 章の検討結果から最も経済的なケーブル構造を採用している。冷却には 154KV 第 2 次モデルケーブル用に開発したユニットを用い、過冷却の液体窒素を両終端箱とケーブルコアの 3 方向に分流して強制循環させて冷却実験と耐電圧試験を行っている。

一方モデルケーブルの送電容量と熱損失の関係を第 4 章の方法により計算により求め、多糸布設し強制冷却した大容量パイプタイプケーブルと比較検討している。

§ 6.2 モデルケーブルの構成

< 6.2.1 > モデルケーブルの構造

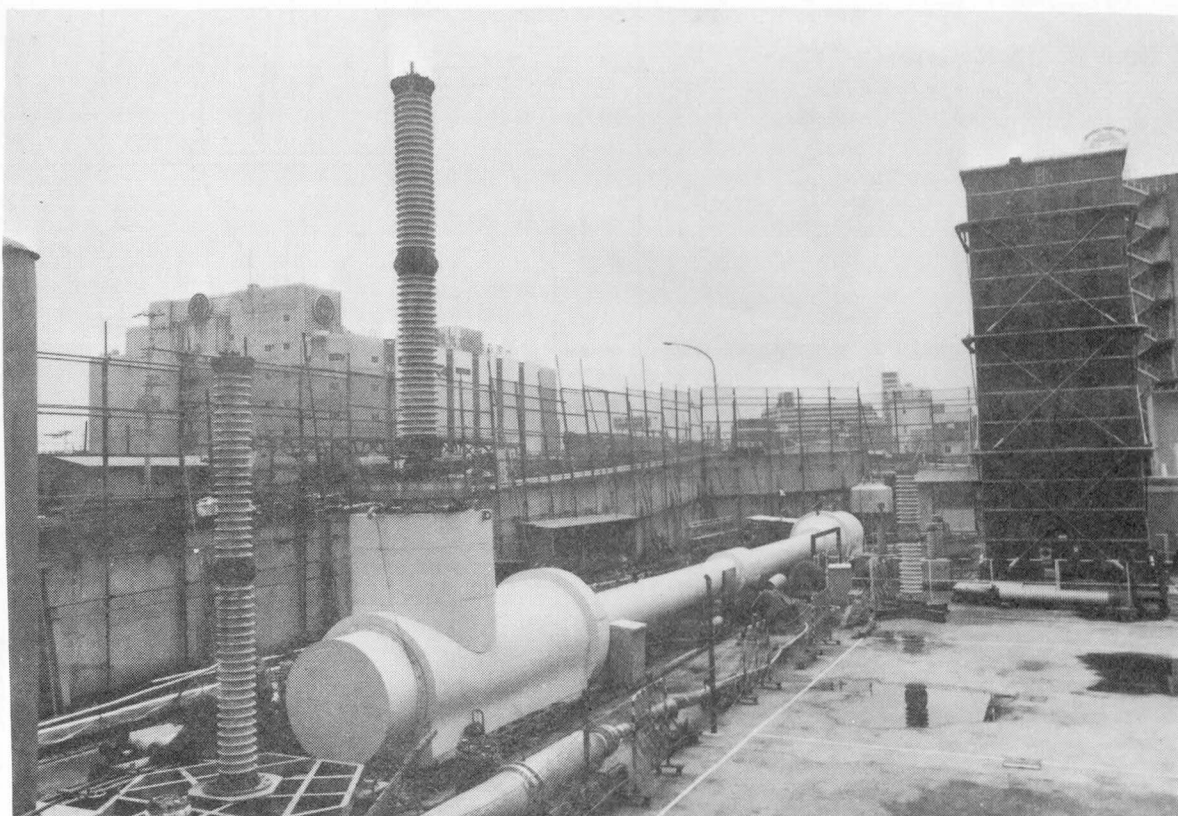
モデルケーブルの構造は第 6.1 図、及び第 6.2 図に示すように 154KV 第 2 次モデルケーブルと同様でこれを 500KV に拡大したものである。有効長 20m の可撓性ケーブルコア 1 相分をフォーム断熱管路に引き入れ両端に極低温終端箱と液中終端箱をとりつけ冷却と耐電圧試験が出来る構造になっている。

ケーブルコアの構造は第 6.3 図のように第 4 章で既に検討したもので、最大コア外径を製造と輸送上の制約からスキッドワイヤ上で 150mm ϕ に押え、導体はアルミ素線の一層リップよりで熱収縮と表皮効果の対策を施しこれにクラフト紙絶縁を行ったものである。

導体断面積と導体内冷媒流路径は< 4.2.6 >と同じ方法で、総発生損失を最小にするように決定した。第 6.1 表にモデルケーブルの仕様を示す。

< 6.2.2 > 導 体

より線構造は第 6.2 表のように第 4.5 表の構造に補助素線を追加したものである。すなわち内径 60mm の冷媒流路を持つハイゼックスパイプ上に 3.34mm ϕ のアルミ素線を第 3.6 図



第 6.1 図 500KVモデルケーブル

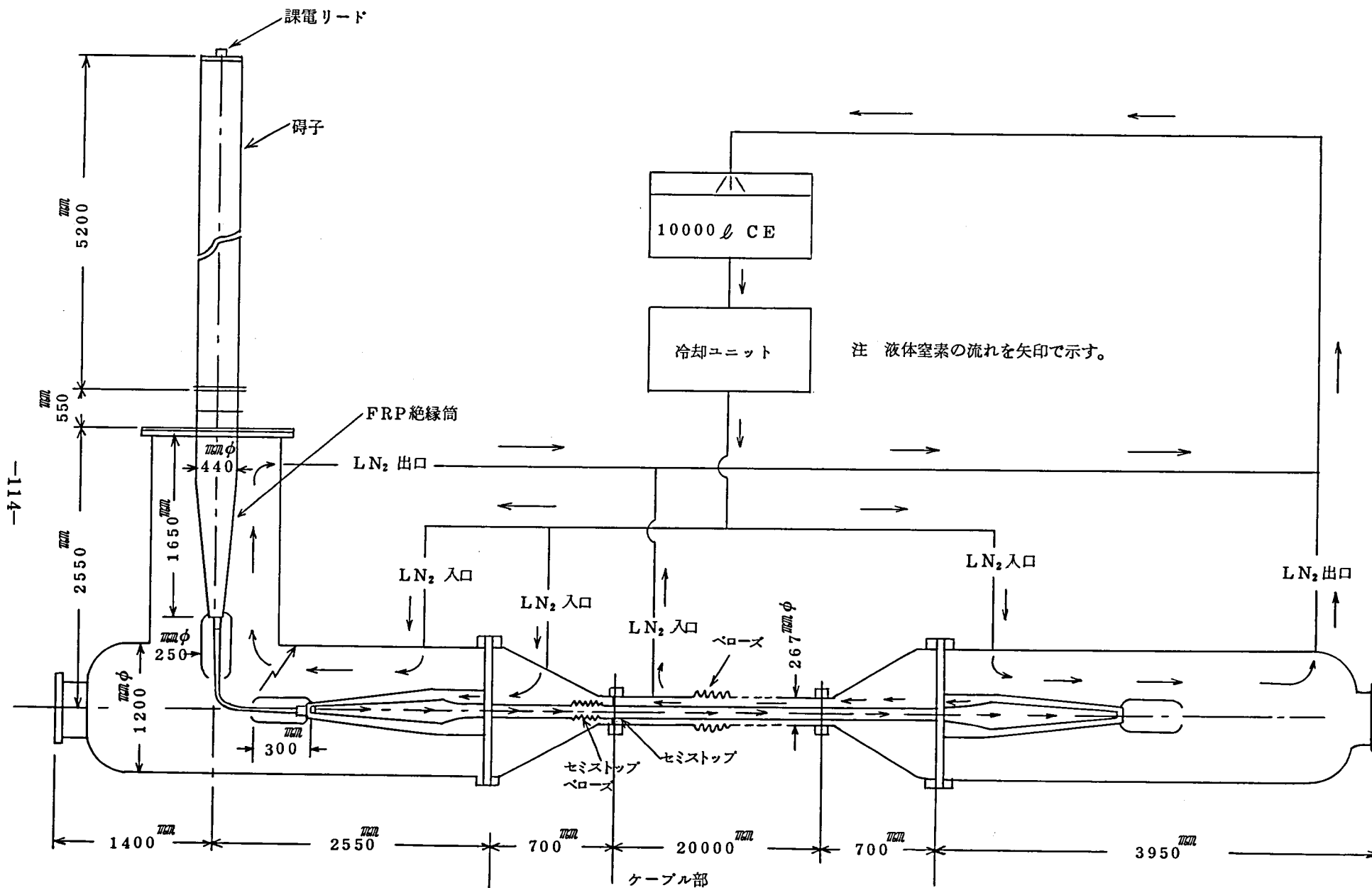
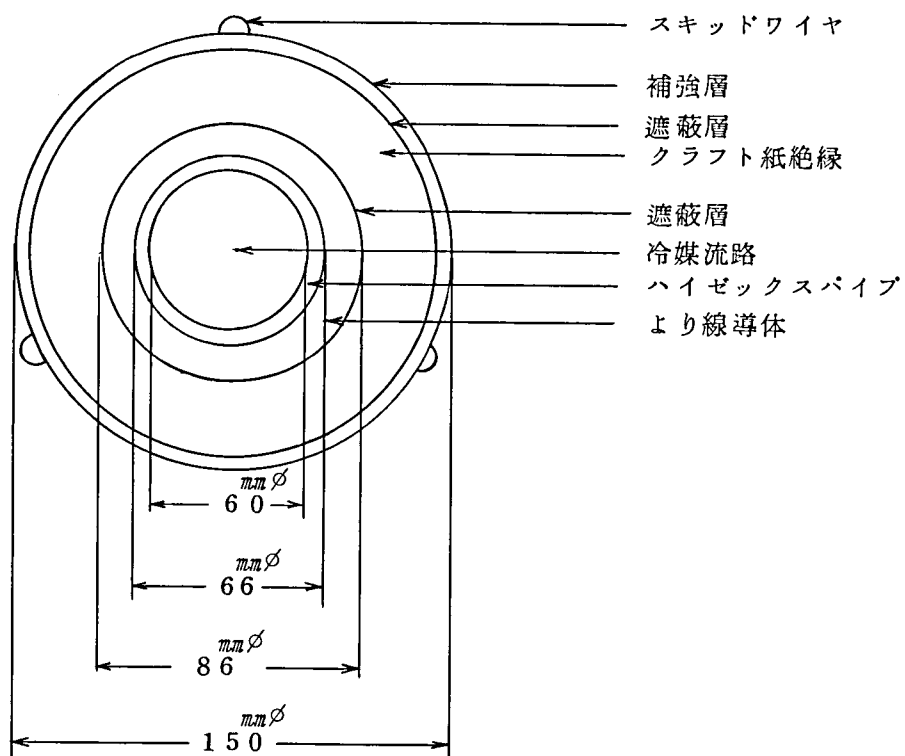


図 6.2 図 500KV モデルケーブルの構成



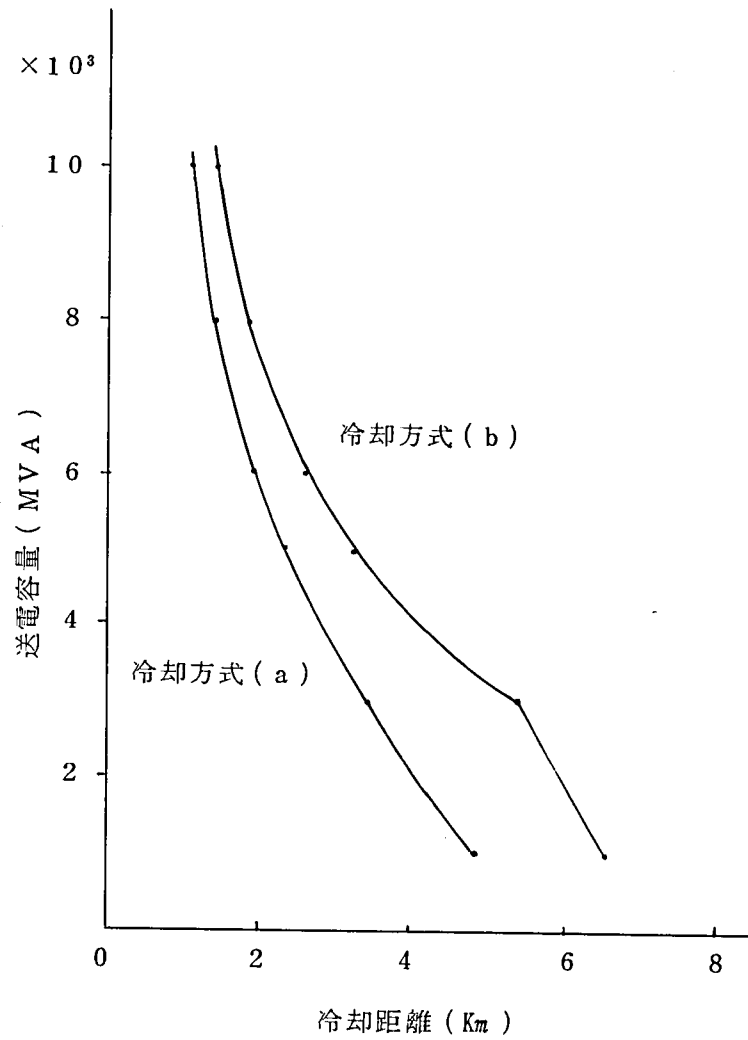
第 6.3 図 500 KV ケーブルコア

第 6.1 表 5 0 0 KVモデルケーブル仕様

定 格	5 0 0 KV, 5,8 0 0 A, 5,0 0 0 MVA
冷 却 距 離	冷却方式 a) にて 2.3 Km " b) にて 3.3 Km
導 体	1 層リッツアルミより線, セグメント本数 2 3 本, 断面積 1,5 6 0 mm ²
絶 縁 体	液体窒素含浸低密度脱イオン水洗クラフト 紙絶縁, 絶縁厚 2 7 mm
低温圧力パイプ	ステンレス鋼管, 外径 2 6 7 mm φ, スチレ ンフォーム断熱, 断熱外径 5 6 8 mm φ
終 端	気中終端箱, 及び液中終端箱
冷 却	過冷却液体窒素強制循環冷却
ケーブル有効長	2 0 m

第 6.2 表 5 0 0 KVモデルケーブル導体構成表

導 体 断 面 積	A mm ²	1,5 6 0
冷 媒 流 路 半 径	r ₁ mm	3 0
導 体 半 径	r _s mm	4 3
セグメント本数		2 3
セグメント素線本数		3.3 4 mm×7本+1.1 8 mm×6本
セグメントよりピッチ	mm	1 3 4
リッツよりピッチ	mm	4 6 1
占 積 率	φ	6 5.4
交流導体抵抗計算値 R (5 0 Hz)	μΩ/cm	0.0 1 8 9



第 6.4 図 モデルケーブルの送電容量と冷却距離

のように表皮効果対策としてリッツよりし、更に非収縮導体としての条件(3.2)式を満足するように、より合せた構造である。しかしリッツより導体は占積率が低いため第3.6図のように補助素線を追加して断面積を約11%増加させ交流抵抗を約8%減少させる事にした。このようにすると補助素線のない場合より5,000 MVAにおける冷却距離をa)方式で約3%, b)方式で5%伸ばす事が出来る。夫々の方式の冷却距離を第6.1表及び第6.4図に示した。

この導体の占積率は65.4%で交流抵抗の計算値は $0.01889 \mu\Omega/cm$ 又交流直流の抵抗比は(2.7)式による計算値で1.18となり実測値1.31とほぼ一致した。

< 6.2.3 > 電気絶縁

第4章で検討したように500 KVで5,000 MVA以上の送電容量ではクラフト紙による絶縁方法が、他のテープ絶縁体よりも冷却距離が最長になり最も経済的になる。一方液体窒素含浸状態のクラフト紙は第2章の絶縁厚0.5 mmの課電試料及び絶縁厚1.2 mmの154 KV第1次モデルケーブルの耐電圧試験結果より、従来のOFケーブルと同程度の絶縁耐力を示している。以上の理由から500 KVモデルケーブルにもクラフト紙を採用する事にした。このクラフト紙は従来の超高压OFケーブルに使用されている低密度脱イオン水洗紙で特性を第6.3表に示した。

絶縁厚は(4.2.2)で述べたように $BIL \times 1.2$ の衝撃電圧1,860 KVに耐えるように2.7 mmとし、導体側のギャップを小さくし積層効果を増すために、100 μ 紙, 125 μ 紙, 150 μ 紙, 200 μ 紙で紙厚によるグレーディングを行った。この場合の上記衝撃電圧の破壊電位傾度⁸³⁾ 89 KV/mmであるが交流使用最大電位傾度は14 KV/mm となってOFケーブルでも高い値になっている。しかし上記絶縁紙の耐電圧特性に対して安全側にある。一方液体窒素含浸テープ絶縁では油浸の場合よりも長期劣化特性が安定しているので交流使用電位傾度⁸⁴⁾を高くとれる事が知られている。

なお第2章の結果よりカーボン紙は遮蔽効果がなく $\tan \delta$ 値を上昇させるので遮蔽には154 KV第2次モデルケーブルと同様に金属化ポリエステルテープを採用した。

ケーブルコアの構造を絶縁構成と共に第6.4表に示す。

液体窒素含浸クラフトの場合にはOFケーブルの油浸の場合とは異って真空乾燥を行って水分を除去しなくても、極低温下で水分が凍結され電気特性に悪影響を与えないことが154 KV第1次モデルケーブルで実証されている。従って500 KVモデルケーブルでもケーブルコアの真空乾燥等の特別な処理を行わなかった。

第 6.3 表 低密度脱イオン水洗クラフト紙の特性

長 さ μm	1 0 0	1 2 5	1 5 0	2 0 0
密 度 g/m^3	0.7 8	0.7 5	0.7 2	0.6 7
$\tan \delta$ % (液体窒素含浸)	0.1 2 2	0.1 2 0	0.1 2 3	0.1 2 7
ϵ (液体窒素含浸)	2.5 5	2.5 2	2.5 0	2.4 6
衝撃破壊電位傾度 KV/mm (液体窒素含浸)	1 0 8	1 0 0	9 0	8 3
交流破壊電位傾度 KV/mm (液体窒素含浸)	4 7	4 2	3 8	3 6
抗 張 力 Kg/1 5 mm縦	1 2.4	1 2.5	1 3.0	1 7.0
横	7.3	7.9	8.0	9.0
伸 び % 縦	2.1	2.3	2.5	2.0
横	6.1	7.2	7.0	5.8
気 密 度 (sec/100cm ²)	6,5 0 0	1,8 0 0	8 0 0	3 8 0

< 6.2.4 > 低温圧力容器

低温圧力容器としては極低温で冷媒の高圧力に耐え低温脆性を示さない材料で、しかもケーブルコアの不均衡磁束によるパイプ損の小さな材料が望まれる。5 0 0 KVモデルケーブルでは冷却と耐電圧試験を目的としたため、パイプ損で問題を残しているけれども、1 5 4 KV第2次モデルケーブルの実績よりステンレス材を採用した。各部の寸法を第6.2図に示す。有効長2 0 mのケーブルコアを収容する1 0" 圧力管路の両端に夫々内径1,2 0 0 mmφの気中終端箱用及び液中終端箱用の圧力容器が取付けられる構造になっている。管路の熱収縮による応力発生を吸収するために1 0" 圧力管路の中間部にベローズ継手を設けた。

気中終端箱と液中終端箱は、夫々台車の上に支えられケーブルコア両端のコンデンサーコイルの組立てと接続に便利な構造になっている。

ガスケット部は1 5 4 KV第2次モデルケーブルと同様に凹凸型の嵌め込み構造でパッキングにはテフロンを用いた。

< 6.2.5 > 熱 絶 縁

1 5 4 KV第2次モデルケーブルでは高断熱性能の真空多層断熱を、施工と性能の検討のために採用したが、第4章で述べたように送電容量が5,0 0 0 MVA 以上になると、導体発熱がかなり大きく0.6 W/cm・φを越えるので侵入熱の影響が小さくなり、真空多層断熱とフォ

第 6.4 表 5 0 0 KV 極低温 ケーブル コア 構造 表

項 目	材 料	寸 法	摘 要
導 体	E C アルミ	1,560mm ²	第 6.2 表参照
遮 蔽	金属化ポリエステルテープ	0.1 × 2 枚	組合せ巻
絶 縁	低密度脱イオン水洗紙	27mm	
	100 μ	3.0mm	
	125	5.4	
	150	6.5	
	200	12.1	
遮 蔽	金属化ポリエステルテープ	0.1 × 2 枚	組合せ巻
外 径		140.8mm	
補 強	金属化ポリエステルテープ	0.1 × 2 枚	組合せ巻
	軟銅テープ	0.2 × 2 枚	組合せ巻
	金属化ポリエステルテープ	0.1 × 2 枚	組合せ巻
	ポリエステルテープ	0.1 × 4 枚	組合せ巻
	ステンレステープ	0.1 × 2 枚	組合せ巻
	ポリエステルテープ	0.1 × 2 枚	組合せ巻
外 径		144mm	
スキッドワイヤ	ハイゼックス	3mm	
外 径		150mm	

ーム断熱の冷凍機間隔に与える差が認められなくなる。それ故 5 0 0 KV モデルケーブルでは熱絶縁として、施工性、信頼性、及び経済性で秀れているフォーム断熱を採用した。なおウレタンフォームは吸湿した場合に常温にて金属を腐蝕する恐れがあるのでスチレンフォームを採用した。断熱層の厚さは周囲温度 3 0 ℃、相対湿度 8 5 % で結露しない条件として (2.1 2) 式より求め、1 0 " 直管部で 1 5 0 mm、両終端部で 1 8 0 mm とした。

< 6.2.6 > 終 端 箱

1 5 4 KV 第 2 次モデルケーブルでは両端に気中終端箱を設けたが 5 0 0 KV モデルケーブルでは、片端のみ気中終端箱を接続し他端には極低温変圧器等の低温機器に直結する場合を考慮して液中終端箱を接続した。

a) 液中終端箱

液中終端箱は第 6.2 図に示すようにケーブルコアの端部にコンデンサーコーンを組立て、これに F R P 絶縁箱を被せて 1 0" 直管部と終端箱との接続部に固定したもので、コンデンサーコーンの先端の電流リードを F R P 絶縁筒に貫通させ、先端に 2 5 0 mm ϕ 、長さ 3 0 0 mm の円筒状アルミ製遮蔽電極を取り付けた。この電極には 0.1 mm 厚のポリエチレン紙で 1 5 mm 厚の補強絶縁を行った。圧力容器の内部空間は液体窒素で加圧冷却すると同時に内部電極を電氣的に絶縁する。

なお、コンデンサーコーンの設計は第 5 章の 5 0 0 KV 終端箱と同様に (5.2 8) 式を用い沿層方向の電位傾度を交流電圧で 0.7 5 KV/mm、衝撃電圧で 2.5 KV/mm にとり電極層数を 6 0 段とした。

b) 気中終端箱

気中終端箱の構造を第 6.2 図に示す。第 5 章で述べた 5 0 0 KV 終端箱を使用しこの極低温端子と、液中終端箱と同じ構造のケーブル側のコンデンサーコーンの端子とを可撓より線で結び、両方の接続部に液中終端箱に使用したのと同じ構造の遮蔽電極を被せたものである。遮蔽電極と可撓より線にはポリエチレン紙による 1 5 mm 厚さの補強絶縁を行った。圧力容器の内部は液中終端箱の場合と同様に、液体窒素で加圧冷却すると同時に可撓より線と遮蔽電極を絶縁する。なお圧力容器の垂直部と水平部の溶接部分にも遮蔽リングを設け電界を緩和した。

§ 6.3 モデルケーブルの冷却

モデル線路の冷却に使用した冷却ユニットは 1 5 4 KV 第 2 次モデルケーブル及び 5 0 0 KV 終端箱の冷却に使用したものであり、液体窒素中の塵埃を除いて耐電圧性の安定を計るために、循環回路には 1 0 μ m メッシュのフィルタをそう入した。

モデル線路の冷却に当って 1 5 4 KV 第 2 次モデルケーブルの場合と同様に、非収縮型ケーブルコアの非収縮特性を確認するために両終端箱の台車を固定して低温圧力パイプの熱収縮をベローズ継手で吸収し、全体として長さ変化を生じないようにした。若し収縮が吸収されなければ、冷却時の 0.4 % の収縮に相当したストレスがケーブル導体内に発生し素線の永久伸びを生じるのは勿論、機械的に弱点と考えられるコンデンサーコーンの先端と F R P 絶縁箱との取り付け部が破壊される可能性がある。

液体窒素の流れを第 6.2 図に示す。1 0,0 0 0 ℓ C E からの液体窒素を加圧循環ポンプで冷却

ユニットに通し過冷却にし，気中終端箱，ケーブルコアを収容する直管部，液中終端箱の3方向に分流し，各部分を冷却後1本の回収パイプに合流させて貯槽に戻し乍ら循環する。ケーブルコアの冷却は，気中終端側のレデューサ内に設けられたセミストップベローズにより液体窒素の流れを拘束しケーブル端末から，導体内冷媒流路に流し他端よりケーブルコア外部に取り出しコア外側と圧力パイプの空間を通して10"直管部入口まで戻す方法とした。

予冷は154KV第2次モデルケーブルと同様に行い約30hで完了した。 $4\text{ Kg/cm}^2\cdot\text{G}$ のCE内圧力で飽和温度に達している液体窒素は加圧循環ポンプで $8\text{ Kg/cm}^2\cdot\text{G}$ まで加圧され，熱交換器で約77Kまで過冷却になる。この場合も154KV第2次モデルケーブルと同様に通電が行われていないので，ケーブル部の液体窒素の温度上昇は $5,000\text{ l/h}$ の流量で殆んど認められなかった。又定常運転の低温圧力容器からの液体窒素の漏れ及び異常温度上昇等は生じなかった。

§ 6.4 モデルケーブルの特性

< 6.4.1 > ケーブルコアの曲げ特性

絶縁体がOFケーブルで実績のあるクラフト紙であり，真空乾燥を行っていないのでOFケーブルの場合よりも機械的に丈夫である。外径の25倍の曲げ径に2往復の曲げ試験を行っても絶縁体に皺，紙切れ等の異常は認められなかった。

< 6.4.2 > 課電試験結果

予冷終了後加圧循環ポンプにて77K， $8\text{ Kg/cm}^2\cdot\text{G}$ の液体窒素を $5,000\text{ l/h}$ の流量で循環し乍ら2hの加圧含浸を行い交流耐電圧及び衝撃電圧破壊試験を行った。結果を第6.5表に示す。交流耐電圧は500KVと650KVで各10分を満足した。其後，衝撃電圧破壊は1,850KV，1回で気中終端側ケーブルコア先端遮蔽電極で（第6.2図矢印し）生じたがBIL；1,550KVに対して約19%の裕度を有しており，液中終端箱，気中終端箱及び非収縮型ケーブルコアを含めてこのモデルケーブルは500KV級として十分な耐電圧特性を示している。

< 6.4.3 > 誘電特性

$\tan \delta$ は使用電圧で0.128%でありOFケーブルでの最低水準値^{85,86)}と同等である。

静電容量の実測値は $0.284\text{ }\mu\text{F/Km}$ でこれより誘電率を算定すると2.48となる。

< 6.4.4 > 送電容量と熱負荷特性

このモデルケーブルの送電容量と熱負荷を従来型大容量ケーブルの一つである強制冷却さ

第 6.5 表 500 KVモデルケーブル電気試験結果

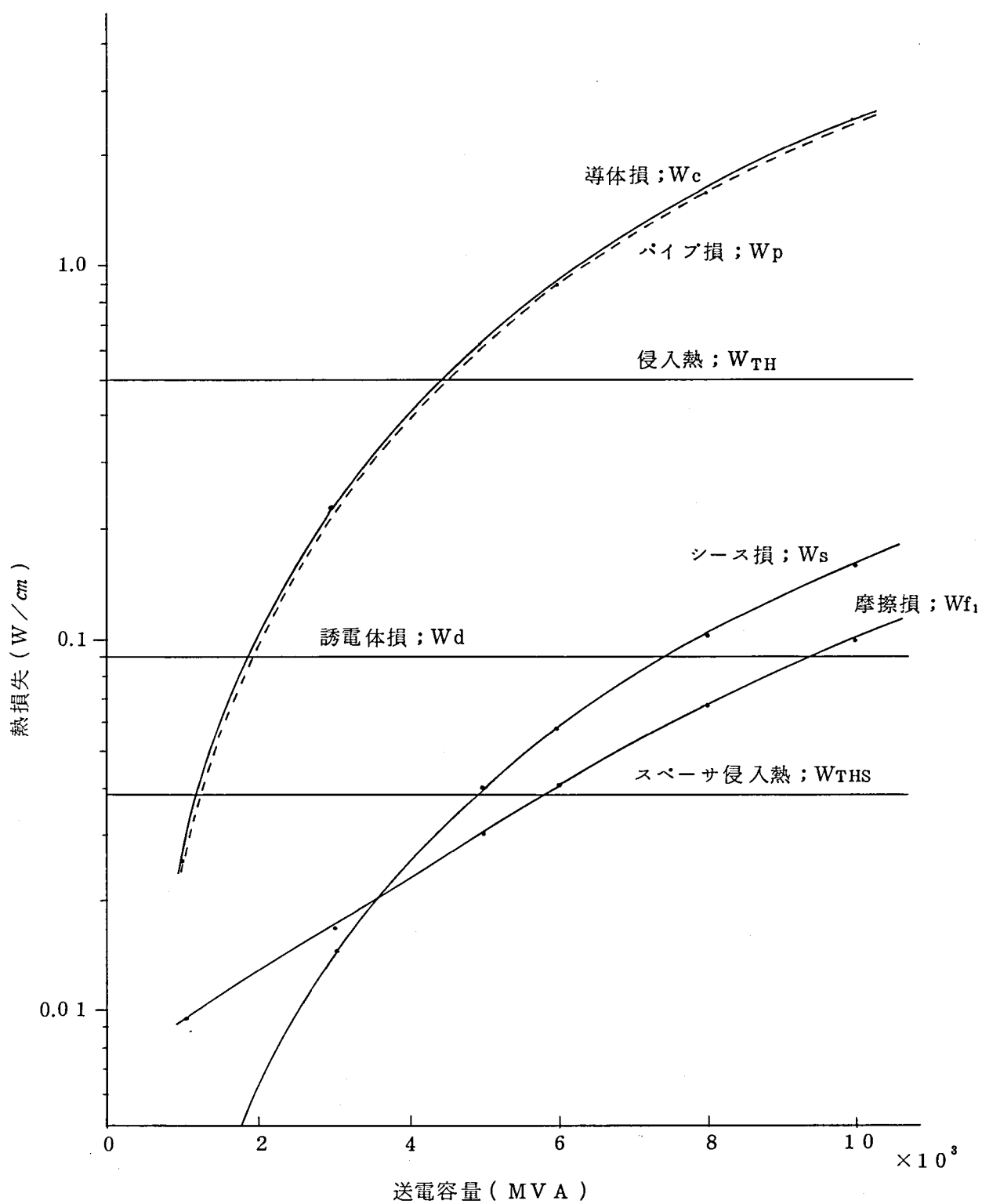
項 目	交 流 電 圧	衝 撃 電 圧
液体窒素圧力 $Kg/cm^2 \cdot G$	8	8
加圧含浸時間 h	2	4
課 電 方 法	200KVより10KV/min で昇圧500KV, 650KV にて10min保持	1,550KV/3回より 50KV/3回で昇圧
破 壊 値	500KV, 650KV 各 10min耐圧	1,850KV1回, 気中終 端側ケーブル先端遮蔽 電極破壊
破 壊 電 位 傾 度 KV/mm	31 以上	88
$\tan \delta$ %	0.12~8 % at 320KV	
ϵ	2.48	

れた500KV3×2,000mm²パイプタイプケーブル(以下POFケーブル)と比較する。

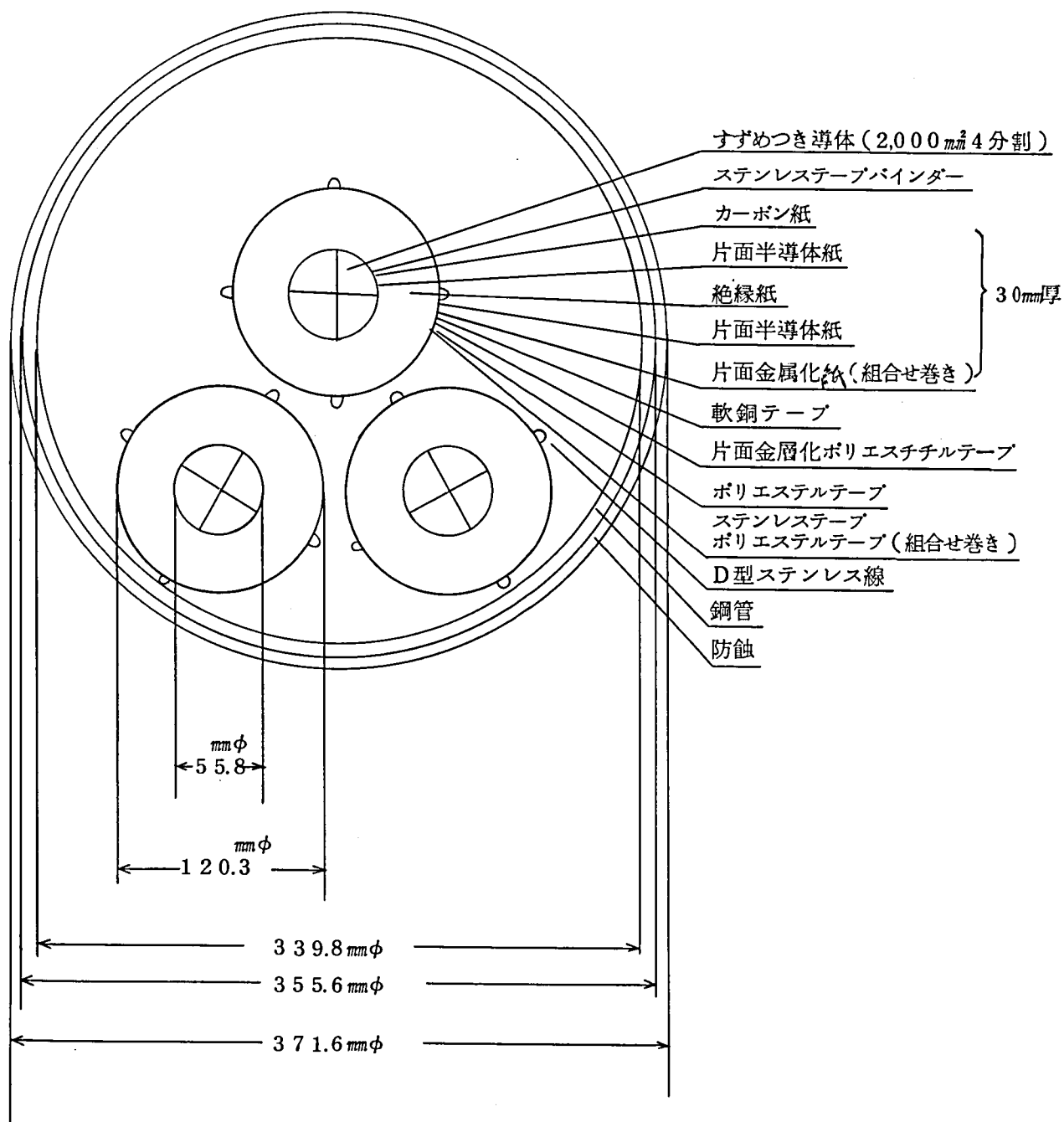
先づモデルケーブルの送電容量と単位長当りの熱負荷の関係を第4章の方法で計算により求め第6.5図に示した。このケーブルは第4章のクラフト紙絶縁500KVケーブルの導体に補助素線を追加したもので、その結果導体損 W_c が約8%小さくなってパイプ損 W_p と殆んど等しくなっている。

モデルケーブルは信頼性を考慮して2回線布設するものとし、比較のためのPOFケーブルの送電容量を以下の仮定で求める。

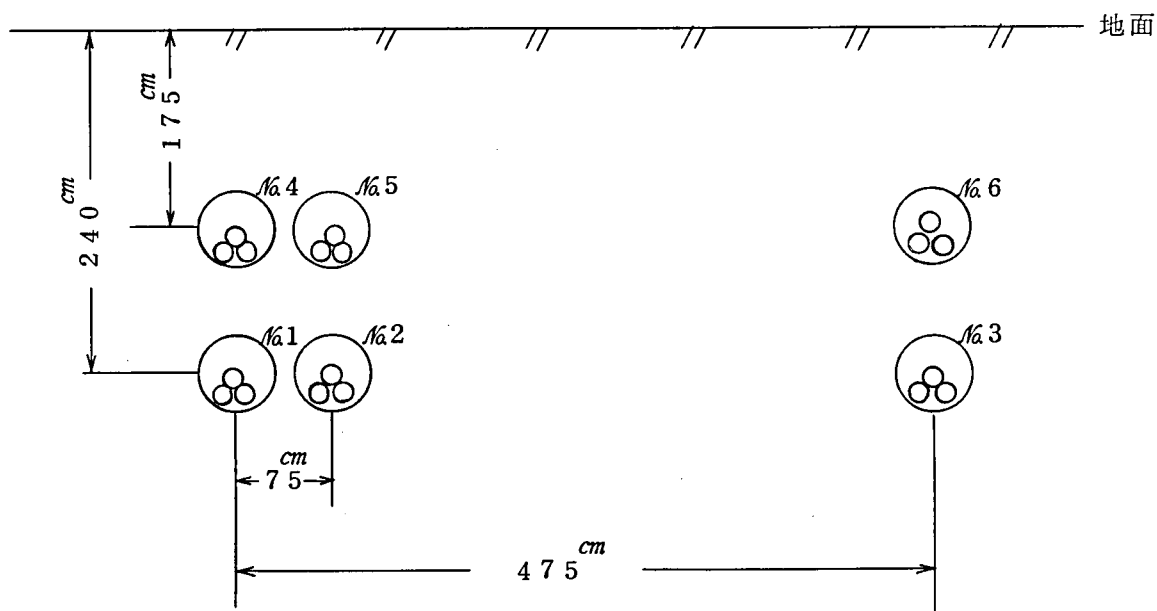
- (1) POFケーブルの構造は第6.6図とする。
- (2) 送電には6回線を用い第6.7図の布設断面の直埋とする。
- (3) 導体最高許容温度は80℃とし冷却用循環油のケーブル入口温度は40℃、圧力降下は $\Delta P = 10 \text{ atm}$ とする。
- (4) 冷却距離は5,000MVA送電における極低温モデルケーブルの冷却方式a)での冷凍機間隔2.3Kmと等しくする。
- (5) 冷却は3回線づつ独立した2グループに分け2回線を循環油の往路に1回線を帰路にとり、ケーブルの片端に冷凍機を置いた第6.8図の冷却方式を考える。尚この場合の循環油量は $\Delta P = 10 \text{ atm}$ の制限から往路で1,300ℓ/min, 帰路で2,600ℓ/minとなる。上述の条件でケーブルの温度分布を計算し送電容量を求めるために第6.9図の熱等価回路



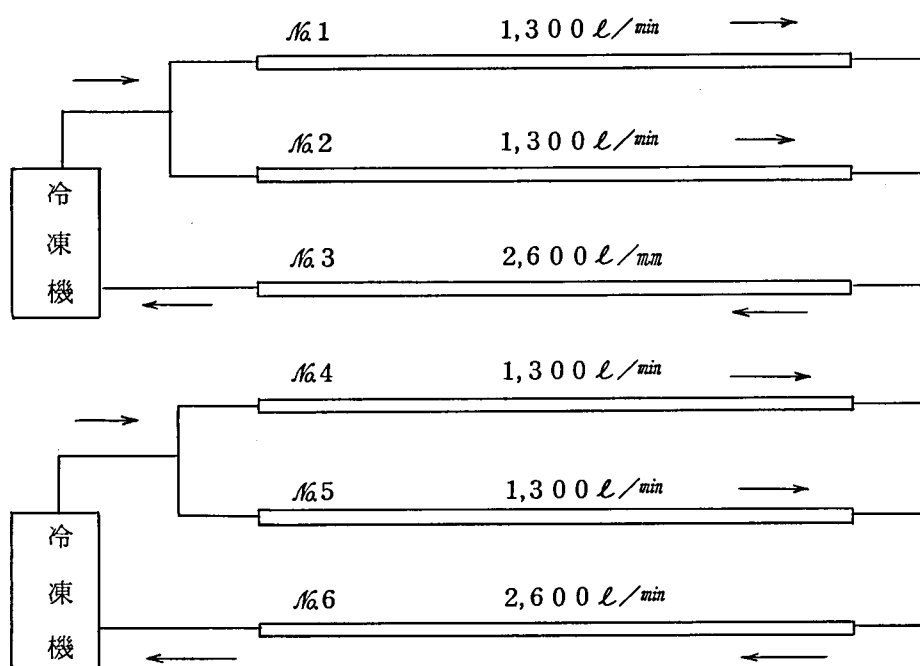
第 6.5 図 500kV 極低温モデルケーブルの熱損失と送電容量



第 6.6 図 500KV 3×2,000 mm^2 POF ケーブル断面

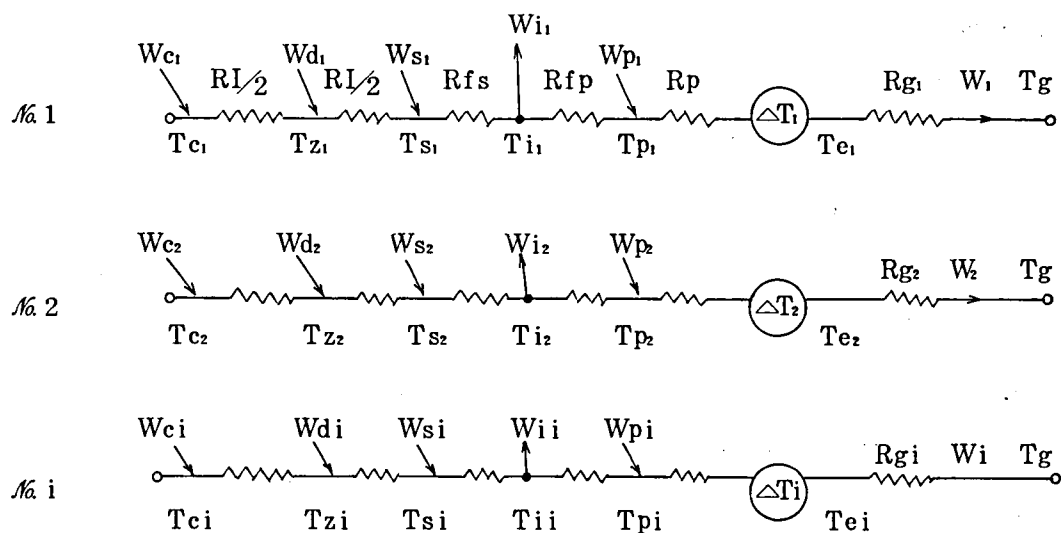


第 6.7 図 P O F ケーブル 布 設 断 面



第 6.8 図 P O F ケーブル 冷 却 方 式

(循 環 油 流 路 よ り 見 た)



第 6.9 図 多条布設 P O F ケーブルの熱等価回路

記号の説明

T_c : 導体温度	W_c : 導体損	R_i : 絶縁体熱抵抗
T_z : 絶縁体中間温度	W_d : 誘電体損	R_{fs} : ケーブル表面境膜熱抵抗
T_s : 補強層温度	W_s : 補強層損	R_{fp} : パイプ内面 //
T_i : 絶縁油温度	W_p : パイプ損	R_g : 土壌熱抵抗
T_p : パイプ表面温度	W_i : 絶縁油の取去る 熱量	R_p : 防蝕層 //
T_e : 防蝕層表面温度		
T_g : 基底温度		
ΔT : 他ケーブルの流出熱による温度上昇		

を考える。これは極低温ケーブルの熱等価回路第 4.8 図と類似のものになるが、導体内冷媒流路が無いために冷媒流路内熱損失 W_{01} がゼロになる事及びパイプに熱絶縁が無いので他ケーブルからの流出熱による温度上昇 ΔT_i を受ける点が異なる。 $\#1$ ケーブルについて ΔT_1 は次式で求められる。

$$\Delta T_1 = \Delta T_2' + \Delta T_3' + \Delta T_4' + \Delta T_5' + \Delta T_6' \quad \cdots \cdots (6.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_2' &= R_{21} W_2 \\ \Delta T_3' &= R_{31} W_3 \\ \vdots \\ \Delta T_6' &= R_{61} W_6 \end{aligned} \right\} \quad \cdots \cdots (6.2)$$

ここに $R_{21}, R_{31} \cdots R_{61}$ は $\#1$ ケーブルと他のケーブルとの相互土壌熱抵抗 ($cm^{\circ}C/W$)

$W_2, W_3 \cdots W_6$ は夫々のケーブルから流出する熱量 (W/cm)

$\Delta T_2', \Delta T_3' \cdots \Delta T_6'$ は夫々のケーブルによる $\#1$ ケーブル温度上昇分 ($^{\circ}C$)

$\#1$ ケーブル以外についても同様にして求める事が出来る。

第 6.9 図及び (6.1), (6.2) 式の関係より § 4.3 と同様にして 8,000~9,000 MVA 送電における各回線の導体と絶縁油の温度分布を計算し第 6.6 表に示した。 ΔT の影響によって各回線の導体と絶縁油の温度分布が異なり $\#3$ ケーブルの循環油出口部分の温度が最も高

第 6.6 表 POF ケーブルの温度分布

送電容量 MVA		8,000		9,000	
ケーブル $\#$	循環方向	循環油温 $^{\circ}C$	導体温度 $^{\circ}C$	循環温度 $^{\circ}C$	導体温度 $^{\circ}C$
1	入口	40.0	55.6	40.0	59.0
	出口	55.1	70.7	58.6	77.5
2	入口	40.0	55.6	40.0	59.0
	出口	55.2	70.8	58.7	77.7
3	入口	55.2	70.8	58.6	77.6
	出口	62.4	78.0	67.5	86.5
4	入口	40.0	55.6	40.0	59.0
	出口	54.8	70.4	58.2	77.2
5	入口	40.0	55.6	40.0	59.0
	出口	54.9	70.5	58.3	77.3
6	入口	54.9	70.5	58.3	77.3
	出口	61.9	77.5	66.9	85.9

第 6.7 表 送電容量と熱損失の比較

項 目	極低温モデルケーブル		P O F ケーブル
送 電 々 圧 KV	5 0 0		5 0 0
導 体 断 面 積 mm^2	1,5 6 0		2,0 0 0
送 電 容 量 MVA	1 0,0 0 0	8,0 0 0	8,0 0 0
回 線 数 c c t	2		6
冷 却 距 離 Km	2.3		2.3
導 体 損 $\frac{W_c}{W/cm}$	3.7 7 8	2.4 1 8	6.1 4 7
誘 電 体 損 $\frac{W_d}{W/cm}$	0.5 3 6		2.4 7 5
シ ー ス 損 $\frac{W_s}{W/cm}$	0.2 4 0	0.1 5 4	0.1 3 6
バ イ プ 損 $\frac{W_p}{W/cm}$	1.2 5 5	0.8 0 3	5.6 2 0
流 動 損 $\frac{W_{f1}}{W/cm}$	0.1 7 9	0.1 3 0	0.4 7 7
流 動 損 $\frac{W_{f2}}{W/cm}$	0.0 0 3	0.0 0 2	0.9 5 3
侵 入 熱 $\frac{W_{TH}+W_{THS}}{W/cm}$	1.0 8 8		
総 損 失 $\frac{W_T}{W/cm}$	7.0 7 9	5.1 3 1	1 5.8 0 8
冷 凍 機 効 率 η	1/6		1
熱 損 失 倍 率	3	2	1
送 電 容 量 倍 率	4	3	1
3 0 Km に対する 全発生損失 MVA	1 2 7.4	9 2.4	4 7.5
有 効 送 電 々 力 MVA	9,9 1 1	7,8 8 8	7,0 8 6
損 失 率 %	1.2 9	1.1 7	0.6 7

くなっている。

第 6.6 表より極低温モデルケーブルが 5,000 MVA 2 回線で 10,000 MVA 送電可能であるのに対し POF ケーブルは 6 回線で 8,000 MVA が限度である事になる。

次に極低温モデルケーブルで 10,000, 8,000 MVA 送電における熱損失を 8,000 MVA 送電の POF ケーブルと比較して第 6.7 表に示した。尚 POF ケーブルの熱損失は JCS 第 168 号 C 電力ケーブルの許容電流に従って計算した。

第 6.7 表より 8,000 MVA 送電においてモデルケーブルの 2 回線は POF ケーブルの 6 回線に比して、シース損以外の各損失は POF ケーブルより小さくこれに熱絶縁からの侵入熱 W_{TH} , W_{THS} が加わっても総合した熱損失は POF ケーブルの約 32% にしかない。

しかしモデルケーブルではこの熱負荷を極低温から常温に排出しなければならないので、冷凍機の入力は総損失 W_T を冷凍機の効率 $\eta = 1/6 \sim 1/9$ で割ったものになる。 $\eta = 1/6$ とすると第 6.7 表に示したようにモデルケーブルでは 10,000 MVA 送電の場合に POF ケーブルの 8,000 MVA 送電に対し、回線全体で約 3 倍の熱損失を生じるが 1 回線当りの送電容量は約 4 倍となる。又同じ 8,000 MVA 送電では回線全体で約 2 倍の熱損失を生じるが 1 回線当りの送電容量は約 3 倍が得られる事になる。

一方 8,000 MVA で亘長 30 Km に対する損失率（全発生損失／有効送電々力）は第 6.7 表のように POF ケーブルの約 1.8 倍となるがしかし有効送電々力は POF ケーブルの 11% 増となる。

このように回線全体で比較すると極低温ケーブルは従来型大容量ケーブルの 2～3 倍の発生損失を生じるが 1 回線当りの送電容量は 3～4 倍をとる事が出来る。

§ 6.5 要 約

液体窒素冷却極低温ケーブルに関するこれまでの実験と検討結果を総合して実規模の 500 KV モデルケーブルの開発を行い、冷却と電気試験を行って下記の結果を得た。

- (1) クラフト紙は 500 KV, 5,000 MVA 大容量極低温ケーブルの絶縁体として十分安定した電気特性を示した。
- (2) 気中終端箱及び液中終端箱は電氣的にも熱的にも安定した特性を示した。
- (3) 低温圧力容器及びケーブルコアの熱収縮対策は十分有効に働いた。
- (4) 低温圧力容器の耐内圧、気密、及び熱絶縁性に異常が無かった。

以上の結果より実規模の 500 KV 級極低温ケーブルの実現性を確立した。

一方このモデルケーブルを信頼性を考慮して2回線布設し、8,000～10,000 MVA送電を行う場合の熱負荷を計算により求めこれを8,000 MVA送電の強制冷却されたPOFケーブル6回線と比較し、熱損失は回線全体で2～3倍になるけれども1回線当りの送電容量は3～4倍とれる事を示した。

第 7 章 結 論

本論文は将来の大容量送電ケーブルの一つである液体窒素冷却極低温ケーブルの構成要素に関する基礎研究と、154KV及び500KVモデルケーブルを開発した研究成果をまとめたもので、その主な成果は次の通りである。

- (1) 導体材料としてのアルミの固有抵抗は、液体窒素温度では純度と熱処理条件の影響は小さく常温の約1/10が得られた。
- (2) 固有抵抗低下に伴う表皮効果の増大対策として導体内部に冷媒流路を持ったリッツより線を採用し、一方冷却時の素線の熱収縮による長さ変化をより線の半径方向に吸収してケーブルコアは長さ変化を生じないより線構造を開発した。
- (3) 液体窒素の絶縁破壊電圧は絶縁油と同レベルであり、これに含浸されるクラフト紙課電試料の耐電圧値は油浸紙と同程度で、一方ポリエチレン紙は衝撃破壊電圧値が油浸紙よりも20～25%低い結果を得た。
- (4) ケーブルコアを収容する低温圧力管路の両端に極低温終端箱をとりつけた154KVモデルケーブルを製作し冷却と耐電圧試験を行った。ケーブルコアは表皮効果と熱収縮の対策を施しポリエチレン紙絶縁を行ったもので交流電圧破壊は154KV級OFケーブルと同程度、又衝撃電圧破壊は約10%低く、課電試料の場合と同様な傾向を示した。
- (5) 154KVモデルケーブルの冷却のために過冷却の液体窒素を加圧循環出来る冷却ユニットを開発し長時間の自動運転に成功した。
- (6) 154KVモデルケーブルでは低温圧力容器の熱的問題に関して、パッキングの材質と構造、熱収縮ベローズの取付方法、熱絶縁方式、パイプの接続方法を具体的に検討し各々について問題点を解決した。
- (7) 500KVケーブルの設計について検討し、製造と輸送上の制約からコアの仕上り外径をなるべく小さく押えた場合に、冷凍機費と10年間運転費を最小にする最も経済的なケーブル構造は冷媒の圧力降下を最小にして冷凍機間隔を最大にするものでなくケーブルの熱負荷を最小にする構造である事を示した。
- (8) ケーブル内の温度分布を計算出来る理論式を誘導し、冷媒の温度上昇と圧力降下の制限値より送電容量と冷却距離の関係を求めた。この結果500KV、4,000～6,000MVAでは、クラフト紙絶縁で冷媒をコアの内外で同方向に流す冷却方式が、又3,000～4,000MVAではポリエチレン紙絶縁で冷媒をコアの外側にのみ流す冷却方式が何れも経済的になる事を示

した。

(9) 終端箱については、油浸紙によるコンデンサーブッシングで電流リードを絶縁し、絶縁油をブッシング内に強制循環することにより低温部の絶縁油の凍結を防止し耐電圧性を向上させ、同時に通電による常温部の温度のピークを取り去る方法を考案して154KVおよび500KV終端箱の開発を行った。一方通電々流に対するリードの温度分布の変化を測定して熱安定性の検討を行い他方では理論式を求めて実測値と比較し、この終端箱が電氣的にも熱的にも安定している事を示した。

(10) これまでの技術的成果を踏まえて気中終端箱と液中終端箱を夫々低温圧力管路の両端に接続し、低温圧力管路の内部に表皮効果と熱収縮の対策を施しクラフト紙で絶縁したケーブルコアを引き入れ500KV5,000MVAのモデルケーブルを製作し、冷却実験と電気試験を行い満足すべき特性を得た。

(11) 一方このモデルケーブルを信頼性を考慮して2回線布設し8,000～10,000MVA送電を行う場合の熱負荷を計算により求め、これを8,000MVA送電の強制冷却したPOFケーブル6回線と比較し熱損失は回線全体で2～3倍になるが1回線当りの送電容量は3～4倍とれることを示した。

以上要するに、本研究では大容量送電500KV極低温ケーブルの実現のために基礎研究を行い表皮効果と熱収縮の対策を施したケーブルコアを開発して154KVモデルケーブルを製作し、冷却実験と耐電圧試験を行い、次いで500KVケーブルの設計について論じ冷却方式と冷凍機間隔の関係を具体的に検討し、更に154KV、500KV終端箱の開発を行い熱安定性と耐電圧特性を実験検討した。終りにこれ等の結果を踏まえて500KV5,000MVAのモデルケーブルの開発を行いその特性を確認して500KV実用ケーブルの実現性を確立したものである。

謝 辞

本研究のとりまとめにあたって終始懇切なる御指導と御鞭撻を賜った京都大学教授工学博士上之園親佐先生，京都大学教授工学博士林宗明先生に心から感謝致します。

本研究のとりまとめにあたって有益なる御教示と御助言を戴いた京都大学教授工学博士川端昭先生に心から感謝致します。

また本研究に対し深い御支持と御指導を賜った藤倉電線株式会社工学博士加賀谷誠一専務取締役，鹿岡貞吉常務取締役役に厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり藤倉電線株式会社内関係各位の御指導と御協力に対し深く感謝致します。

引 用 文 献

- (1) I. Kubo, O. Yamada, N. Shiseki: 5th International Cryogenic Conf. G9 (1974)
- (2) 日高 ; 電気四学会連大会 S. 3 - 4 (昭 45)
- (3) 品川, 藤原, 草野 ; 第 17 回低温工学研究発表会 (1976)
- (4) T. Mizukami, M. Fukasawa et al IEEE July (1977)
- (5) E. B. Forsyth et al IEEE Trans PAS 92No2, 494 (1973)
- (6) P. Graneau ; Cryogenics Jan. (1975)
- (7) P. Graneau, L. B. Thompson ; Cryogenics 12. 366 (1972)
- (8) K. N. Mathes ; IEEE Trans, vol EI-2 No124 (1967)
- (9) 電気学会 ; 誘電体現象論
- (10) M. J. Jefferies ; IEEE Trans Vol EI-5 No83 (1970)
- (11) K. N. Mathes ; IEEE Trans Vol EI-2 No124 (1967)
- (12) 久保, 志関 ; 電気学会全大 984 (昭 49)
- (13) M. J. Chant ; Cryogenics 7 (1967)
- (14) B. Fallow, J. C. Bolo ; CIGRE (1974)
- (15) J. C. Bolo, M. Perrier ; Rev-Gen. Elcct. 77. 605 (1968)
- (16) 久保, 山田, 志関 ; 藤倉技報 49 (昭 48)
- (17) 加賀谷 ; 超高圧送電, 日刊工業 244 (昭 36)
- (18) P. E. Glaser ; Cryogenics Eng. News Apr (1966)
- (19) 中川, 高橋 ; 真空 6(7) (昭 38)
- (20) NASA ; Thermal Insulation (SP-5027)
- (21) Scott. R. B. "Cryogenic Engineering" (1959)
- (22) 杉山, 長坂 ; 断熱工学 槇書店 (昭 46)
- (23) 音馬, 菊地 ; ウレタン断熱工業材料 19(8) (昭 46)
- (24) 文献 (1), (16)
- (25) S. J. Rigby, B. M. Weedy ; Cryogenics Aug (1975)
- (26) K. N. Mathes, M. J. Jefferies IEEE Winter Power Meeting Jan (1970)
- (27) S. H. Minnich, G. R. Fox ; Cryogenics Vol 19. No3.
- (28) 久保 ; 電学論文誌 55-B-1 (昭 55)

- (29) P. Graneau, L. B. Thompson; Cryogenics Dct (1972)
- (30) E. E. I. Project RP-78-6 Phase A (1969)
- (31) 文献(1), (16)
- (32) 久保; 電学論文誌 53-B-14 (昭53)
- (33) 久保, 志関; 第12回低温工学研究発表会 A2-2 (昭48)
- (34) 文献(28)
- (35) 電中研; 極低温送電 (昭48)
- (36) 岩田, 城戸, 中島; 古河電工事報 No53 (1972)
- (37) 山本, 根本, 志関; 電気学会全大 No295 (昭47)
- (38) 深沢, 城戸, 中島; 電気学会全大 No1186 (昭48)
- (39) 丹田, 藤原, 草野; 第17回低温工学研究発表会 A3-12 (1976-11)
- (40) 深沢, 永野; 第18回低温工学研究発表会 S2-1 (1977-6)
- (41) G. Bogner; Cryogenics. Feb (1975)
- (42) S. J. Rigby, B. M. Weedy; Underground Transmission Conf (1976)
- (43) 文献(30)
- (44) 日本電線工業会; JCS 168号C (昭48)
- (45) D. A. Swift; Cryogenics Vol 48 No4 (1968)
- (46) B. M. Weedy, S. J. Rigby; Underground transmission & distribution Conf (1976)
- (47) 久保, 志関; 第11回低温工学研究発表会 B2-13 (昭48)
- (48) W. H. McAdams; "Heat Transmission" McGraw-Hill (1954)
- (49) 伊原, 堀米; 電学論文誌 91, 950 (昭46)
- (50) 岩田, 信田, 菊地; 電気学会全大 No1191 (昭50)
- (51) E. C. Rogers; Proc IEEE Vol 122 No9 Sept (1975)
- (52) 文献(48)
- (53) K. Edeny; Cryogenics December (1967)
- (54) 経済調査会; 積算資料 (昭54)
- (55) 文献(35)
- (56) G. R. Fox, S. H. Minnich; Mechanical Engineering 7 August (1970)
- (57) R. L. Carvin, J. Matisco; Proc IEEE 55, (1967)
- (58) H. Voigt; Conf. on Low Temperature & Electric Power 24~26 March(1969)

- (59) S. Neal ;Cryogenic Engineering News Aug 30 (1968)
- (60) E. C. Rogers ;Conf. on Low Temperature & Electric Power March (1969)
- (61) C. A. Arkell etal ;Proc IEEE Vol 124 No3 March (1977)
- (62) E. H. Ball etal ; " " "
- (63) U. C. Arnand etal ; " " "
- (64) C. A. Arkell etal IEEE PES Summer Meeting July (1977)
- (65) 文献 (32)
- (66) F. Schauer ;Cryogenics May (1978)
- (67) 深沢, 杉山, 他 ;第19回低温工学研究発表会 (昭52-11)
- (68) P. Graneau ;Electrical World June (1976)
- (69) P. Graneau, L. B. Thompson ;Underground Transmission Conf. (1976)
- (70) 電気学会 ;放電ハンドブック 117 (昭33)
- (71) 文献 (35)
- (72) 野口, 河野, 凰 ;電学論文誌 A-92, 129 (昭47)
- (73) S. F. Mauser etal IEEE PES Winter Meeting Jan. (1976)
- (74) C. K. Tsao Cryogenics Nov. (1974)
- (75) 等々力 ;電総研彙報 36, 12, 831, (昭47)
- (76) 霜村, 稻見, 木下 ;第16回低温工学研究発表会 A1-4 (昭51)
- (77) 電気学会 ;電気工学ハンドブック 1397 (昭51)
- (78) 文献 (48)
- (79) 久保, 志関 ;電気学会全大 1190 (昭50)
- (80) 久保, 志関 ; " 1106 (昭51)
- (81) 久保, 志関 ;第14回低温工学研究発表会 A2-4 (昭49)
- (82) 文献 (17)
- (83) 飯塚他 ;電力ケーブル技術ハンドブック (1974)
- (84) J. R. Juchniewicz, A. T. Bulinski Cryogenics July (1975)
- (85) G. S. Eager, D. A. Silver ;IEEE PES Summer Meeting July (1975)
- (86) 菊地 ;電気学会全大 S-10-1 (昭48)

付録 記号表

本文で使用した記号，略号等の主なものをまとめて示す。

A	導体断面積
A_c	導体内冷媒流路断面積
A_i	熱絶縁受熱面積
A_S	補強層断面積
A_{F1}	F R P 絶縁筒円錐部表面積
A_{F2}	〃 円筒 〃
A'	外部導体断面積
a	ケーブルコア正 3 角形配置の中心から導体中心までの距離
B	磁束密度
B_{av}	平均磁束密度
B_m	最大磁束密度
C	静電容量
C_b	絶縁破壊の常数
C_i	絶縁油比熱
C_p	冷媒比熱
C_{o1}	冷凍機の 10 年間運転費
C_{o2}	〃 資本費
C_n	コンデンサーの n と $(n+1)$ 電極間の静電容量
D	油通路内径
D_h	流体直径
d	電極間隙
d_p	常温時パイプ直径
d'_p	冷却後 〃
f	周波数
f_e	コンデンサー隣接電極間外部沿面距離
f_r	ファニングの摩擦係数
G_{TH}	熱絶縁層のヒートコンダクタンス

G_{THS}	スぺーサのヒートコンダクタンス
H_r	10 年間時間
h_F	F R P 絶縁筒液体窒素間熱伝達率
h_{F1}	" 円錐部絶縁油間熱伝達率
h_{F2}	" 円筒部 "
h_o	リードと液体窒素間熱伝達率
h_i	リードと絶縁油間熱伝達率
h'	外部導体と大気間 "
I	電 流
k	電流リードの熱伝導率
k_i	熱絶縁の等価熱伝導率
k_n	n 電極と導体間静電容量
k_s	スぺーサの熱伝導率
L	線路長
L_i	油通路長
L_p	パイプ長
L_r	冷凍機間隔
L_s	スぺーサ長
l	常温時素線長
l_n	コンデンサー n 電極長
l_s	補強層ピッチ
l'	冷却時素線長
M	冷媒流量
M_i	導体内冷媒流路冷媒流量
M_o	コア外側冷媒流路内冷媒流量
m	絶縁油循環油量
N	外部導体本数
N_e	電極総数
Nu	ヌセルト数
n	熱絶縁シールド総数

P	より線ピッチ長
P_c	導体損
P_e	電力料
P_f	占積率
Pr	プラントル数
Pr_l	負荷率
P_v	渦電流損
P_o	リード周長
P_i	中空油通路周長
P_n	n 電極と大地間静電容量
P'	外部導体周長
$\triangle P$	冷媒圧力降下
$\triangle P_T$	冷媒総圧力降下
Q_1	リードから液体窒素への侵入熱
Q_2	F R P 絶縁筒から液体窒素への侵入熱
q_{SI}	熱絶縁層からの侵入熱
q_{THS}	スペーサ //
Re	レイノルズ数
R_h	熱絶縁熱抵抗
R_i	絶縁体熱抵抗
R_{fc}	導体内冷媒流路境膜熱抵抗
R_{fp}	パイプ内面境膜熱抵抗
R_{fs}	コア表面境膜熱抵抗
R_g	土壌熱抵抗
R_p	防蝕層熱抵抗
R_s	補強層熱抵抗
r	導体半径
r_m	平均導体半径
r_{Sm}	シース平均半径
r_i	冷媒流路半径

r_2	導体内半径
r_3	導体外半径
r_4	コア半径
r_6	低温圧力パイプ内半径
r_7	熱絶縁層内半径
r_8	〃 外半径
S	より線の素線直径
Sc	ケーブルコア間距離
T	温度
T_g	基底温度
T_i	絶縁油温度
T_{i0}	〃 初期温度
T_z	絶縁体中間温度
ΔT_i	他ケーブルの流出熱による温度上昇
t_s	スペーサ肉厚
T_0	冷媒温度
T_∞	外気温度
V	破壊電圧
V_0	線間電圧
v	冷媒流速
W	ケーブルコア単位長さ当りの発生損
W_d	誘電体損
W_f	流動摩擦損
W_{f1}	導体内冷媒流路流動摩擦損
W_{f2}	コア外側冷媒流路流動摩擦損
W_h	侵入熱
W_T	総発生損失
W_S	シース回路損
W_i	絶縁油の取去熱量
X_m	補強層リアクタンス

α_{ci}	冷媒の熱伝達率
α_{∞}	熱絶縁外層と外気との熱伝達率
δ_c	導体の表皮深さ
δ_p	パイプの表皮深さ
ε	誘電率
ε_s	シールド層の輻射率
λ_{ci}	冷媒の熱伝導率
μ_0	真空の透磁率
ρ_c	導体の固有抵抗
ρ_{LN}	液体窒素の密度
ρ_s	補強層の固有抵抗